الفهرس

تمهيد

يخضع اختيار طريقة نقل وتوزيع الطاقة الكهربية ـ كما هو الشأن في جميع الاختيارات الهندسية ـ إلى عوامل إقتصادية وعوامل فنية. وتُجرى المقارنة عادة عند اختيار وسيلة النقل والتوزيع بين الخطوط الهوائية Over head lines والكابلات الأرضية Underground cables

تُستخدم خطوط النقل الهوائية على نطاق واسع للنقل والتوزيع في المناطق الريفية والمناطق غير المأهولة وذلك لأسباب اقتصادية بحته. وتُستخدم الكابلات عادة في منظومات التوزيع داخل المنشآت الصناعية وكذلك داخل المدن وفي المناطق المأهولة بالسكان، كما تُستخدم في منظومات النقل على جهد ٦٦ ك. ف أو أكثر عندما يتعذر النقل بخطوط هوائية بسبب ظروف البيئة أوعندما يكون النقل بخطوط هوائية غير مأمون، كما يفضل ـ في كثير من الأحيان ـ استعمال الكابلات لأسباب عديدة منها الأمان وضمان عدم حدوث أعطال أو حوادث أو بالقرب من المطارات وعبر ممرات المياه المتسعة أو في المناطق المحتمل تعرضها لكوارث طبيعية أو أعمال تخريبية. إلا أنه يجب ملاحظة أن تكاليف استخدام الكابلات تكون عادة أعلى من تكاليف الخطوط الهوائية كما أن مصاريف صيانتها وإصلاحها أكبر.

توجد خبرتان رئيسيتان لصناعة الكابلات في العالم، الخبرة الأمريكية والخبرة الأوروبية. ورغم أن مبدأ صناعة الكابلات واحد للخبرتين إلا أن هناك بعض السمات المميزة لكل خبرة، فنجد أن الصناعة الأمريكية لا تفضل

استخدام الورق كمادة عازلة في الكابل وإنما بدأت باستخدام المطاط ثم استخدام المواد المؤلفة Polymeric materials المنتجة من صناعات البتروكيماويات. نجد في نفس الوقت أن الصناعة الأوروبية - وخصوصاً في انجلترا - استخدمت الورق المشبع بالزيت على نطاق واسع كمادة عازلة في الكابل وذلك منذ بداية هذا القرن وحتى الآن على الرغم من إنتاجها للعديد من أنواع الكابلات ذات المواد المؤلفة.

تُصنف الكابلات في كثير من المراجع تبعاً لجهد التشغيل على أساس جهد منخفض .L.V وجهد متوسط .M.V وجهد عال .H.V وجهد فائق .E.H.V. ونحن نوصي بعدم استخدام مثل هذا التصنيف حيث لا يوجد تصنيف عالمي يحدد القيم العددية لحدود هذه الجهود، والأفضل من ذلك هو ما تستخدمه معظم مصانع الكابلات الآن وهو الإشارة إلى جهد الكابل بالكمية (U_0/U) حيث تشير U_0 إلى الجهد بين الموصل والأرض أثناء التشغيل وتشير U إلى جهد الموصلات التي يصمم عليها الكابل. تعطى U_0 ،U بالقيمة التأثيرية (.r.m.s) لكل منهما.

تتشابه كل الكابلات في أنها تحتوي على موصلات لحمل التيار وعازل محيط بالموصلات ونوع من الغطاء الخارجي لتقديم الحماية الميكانيكية وكذلك الحماية من التآكل والبلى، وذلك لضمان عمل العازل بطريقة جيدة خلال فترة العمر الافتراضي لعمل الكابل.

تصنع الكابلات إما بقلب واحد Single Core أو قلبين أو ثلاثة قلوب وربما أكثر من ذلك. وقلب الكابل عبارة عن موصل يحيط به مادة عازلة تعزله عن باقي القلوب وكذلك مكونات الكابل.

إن المفاضلة بين اختيار كابل وحيد القلب Single-core cable أو كابل عديد القلوب Multicore cable تخضع لعوامل كثيرة منها ما هو فني تقتضيه الظروف للحصول على أداء معين تحت شروط معينة، ومنها ما هو إقتصادي. يمكن القول بصفة عامة أن استخدام الكابلات عديدة القلوب يؤدي إلى خفض تكاليف الكابل وكذلك خفض هبوط الجهد بالإضافة إلى استخدام إقتصادي

أفضل لمجاري الكابلات. وعلى الجانب الآخر فإن استخدام الكابل وحيد القلب يهيء مرونة أفضل وسهولة في التركيب والتوصيل. ولهذا يفضل استخدام الكابلات وحيدة القلب داخل المباني نظراً لكثرة وحدّة تعرض الكابل للانحناءات وكذلك كثرة عمل التفريعات والتوصيلات على الكابل.

يشترط في العازل المحيط بالكابل أن تتوفر فيه الخواص الآتية:

١ ـ عمر افتراضي طويل.
٢ ـ شدة عزل كهربية عالية High dielectric strength لفترة طويلة
٣ مقاومة عالية للكورونا (التفريغ الهالي) والتأين.
٤ ـ مقاومة لدرجات الحرارة العالية.
٥ ـ مرونة ميكانيكية.
٦ ـ مقاومة للرطوبة.
٧ ـ فقد صغير في العازل.

من المستحيل أن نجد مادة تكون الأفضل في جميع الخواص السابقة. وعلى ذلك فإن اختيار المادة العازلة المناسبة يخضع للمواصفات المطلوب تحقيقها. إننا نجد ـ على سبيل المثال ـ أن الورق المشبع بالزيت له أعلى شدة عزل كهربية مع أطول فترة عمر إفتراضي بالمقارنة بجميع العوازل الأخرى المستعملة، ورغم ذلك فإنه غير مقاوم للرطوبة كما أنه غير مرن مثل مرونة بعض المواد الأخرى. علاوة على ذلك فإن مادة مثل الأسبستوس تتحمل درجة حرارة أعلى من الورق المشبع بالزيت.

استخدم سيمنز أول كابل معزول بمادة تسمى جتا ـ برشا عام ١٨٤٧. وتم إنتاج ٣٠٠٠ ميل من هذا الكابل أستخدمت في دوائر البرق (التلغراف). ثم استخدمت هذه المادة عام ١٨٨٠ في صناعة كابل لنقل القدرة الكهربية. ومنذ ذلك الحين استمر التطور في صناعات المواد العازلة للكابل وكذلك في تحسين الخواص الكهربية والميكانيكية لمكونات الكابل والمواد الداخلة في تركيبه. ونحن نجد الآن كابلات تعمل في نقل كميات هائلة من القدرة الكهربية على جهود فائقة وصلت إلى أكثر من ٧٠٠ ك ف.

يُقسم المهندسون الكابلات عادة إلى ثلاث فئات رئيسية :

١ ـ كابلات التمديدات المرنة Wiring cables

٢ ـ الكابلات المستخدمة في التغذية والتوزيع Supply distribution cables

٣ ـ كابلات النقل Transmission cables وهي الكابلات التي تستعمل في نقل الكميات الكبيرة من القدرة الكهربية وتعمل عادة على جهود ٦٦ ك ف وأعلى من ذلك حتى حوالي ٧٠٠ ك ف.

سوف نركز في كتابنا هذا على كابلات الفئتين الأولى والثانية حيث أنها متشابهة في الخواص والتركيب والتشغيل. أما كابلات النقل على جهود عالية فإن بها إختلافات جوهرية ليس مجالها هذا الكتاب.

المواد المستعملة في صناعة الكابلات

تحتاج صناعة الكابلات إلى استخدام مواد كثيرة ومتنوعة. كما أن طرق تجميع وصناعة الكابلات عديدة هي الأخرى. تشترك أغلب الكابلات في أن بها مكونات أساسية يمكن تلخيصها فيما يأتي:

أ - الكابلات وحيدة القلب

١ - الموصل.
٢ - العازل.
٣ - الغطاء والحماية الخارجية.

ب - الكابلات عديدة القلوب

١ - الموصل.
٢ - عازل الموصل.
٣ - مادة حشو.
٤ - سير أو حزام Belt لربط موصلات الكابل وعوازلها.
٥ - ستارة Screen حول كل عازل موصل أو حول العوازل كلها معاً.
٦ - الغطاء والحماية الخارجية.

تجدر الإشارة هنا أنه ليس من الضروري وجود كل هذه المكونات في نفس الكابل كما سيأتي بيانه على التفصيل فيما يلي:

أولاً: قلب الكابل - الموصل Core - Conductor

قلب الكابل هو المادة الموصلة الحاملة للتيار. ويجب أن تكون معزولة عن باقي مكونات الكابل. ويتكون القلب عادة إما من سلك واحد ويسمى موصل مصمت Solid Conductor أو من عدد من الأسلاك المجدولة معاً ويسمى موصل مجدول Stranded Conductor.

يُستخدم النحاس والألومنيوم عادة في صناعة موصلات جميع كابلات القوى الكهربية. توجد بعض أنواع الكابلات الخاصة تستعمل موصلات الصوديوم.

يفضل عادة استخدام موصلات النحاس بسبب توصيليتها Conductivity الأعلى وكذلك بسبب الخواص الميكانيكية والكيماوية الأفضل للنحاس، إلا أن موصلات الألومنيوم تُستخدم أيضاً على نطاق واسع بسبب رخصها وخفض وزن الألومنيوم بالنسبة للنحاس وذلك لنفس قيمة التيار المار في الكابل. يعطي الجدول ٢ - ١ أهم الخواص الكهربية للمعادن الداخلة في صناعة مكونات الكابلات.

١ . الموصلات النحاسية Copper conductors

حددت اللجنة الدولية الكهروتقنية IEC المقياس العالمي لمقاومية النحاس Resistivity المخمّر (الملدّن) Annealed على أساس أن نحاساً مقاوميته ١,٧٢٤ ميكروأوم.سم عند درجة حرارة ٢٠°م تكافىء مقاومية مقدارها ١٠٠٪

تُستعمل موصلات نحاسية دائرية مصمتة حتى مساحة مقطع ١٦مم٢ على الأكثر، كما تستعمل الموصلات النحاسية المجدولة. يجب إستعمال الموصلات المصمتة في الحالة المخمرة حتى لا تكون شديدة الصلادة. تتكون الموصلات المجدولة من مجموعة من أسلاك دائرية صغيرة ملتوية معاً على بعضها في طبقات متمركزة. يجب أن يتم الجدل بدرجة عالية جداً من الدقة،

حيث يجب توفير أقصى قدر ممكن من المرونة وقابلية للإنحناءات الشديدة نظراً لتعرض الكابل لمثل تلك الانحناءات أثناء عمليات التصنيع واللف على بكرات النقل وكذلك أثناء عمليات تركيب وتوصيل الكابل نفسه.

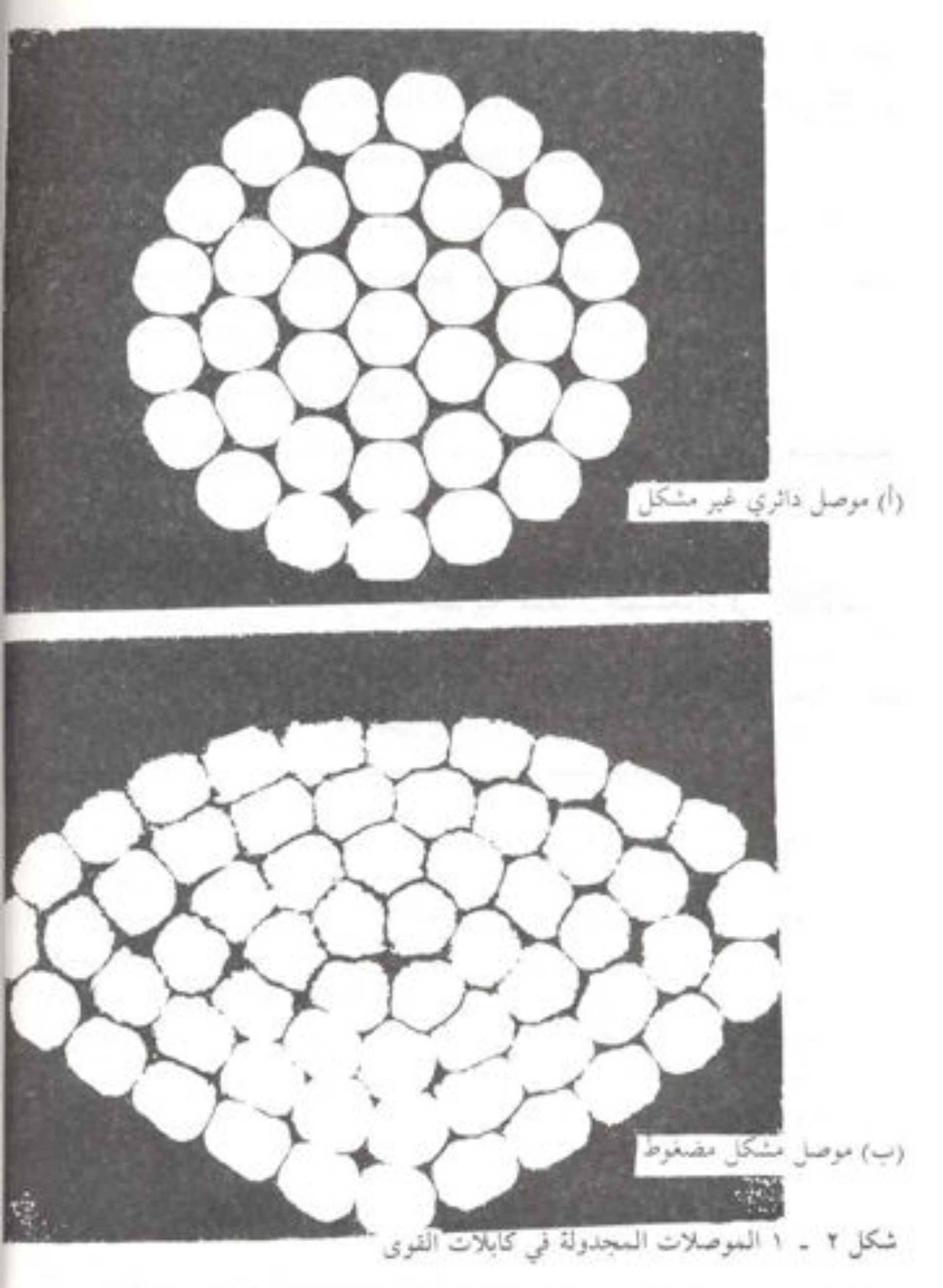
يصنَع الموصل عادة إما على شكل دائري كما في الشكل ٢ - ١(أ) وإما على شكل مضغوط Compact (موصل مُشكل) كما في الشكل ٢ - ١(ب). تمنح عملية تشكيل وضغط الموصل المميزات الآتية للكابل.

١ - ملاسة ونعومة أكثر لسطح الموصل.
٢ - أبعاداً أقل للموصل ومن ثم للكابل كله، كما هو موضح بالشكل ٢ - ٢.

جدول ٢ـ١ الخواص الكهربية للمعادن المستعملة في الكابلات

المعدن	التوصيلة النسبية (النحاس ١٠٠)	المقاومة عند ٢٠°م أوم متر × ١٠ ^-٨	المعامل الحراري للمقاومة لكل °م عند ٢٠°م
الفضة	١٠٦	١.٦٢٦	٠.٠٠٤١
النحاس المخمر	١٠٠	١.٧٢٤	٠.٠٠٣٩
النحاس الصلد	٩٧	١.٧٧٧	٠.٠٠٣٩
النحاس المقصدر	٩٩ـ٩٥	١.٨١٤ـ١.٧٤١	٠.٠٠٣٩
الألومنيوم الطري	٦١	٢.٨٠٣	٠.٠٠٤٠
الألومنيوم (٠/' صلد - صلد) (½H-H)	٦١	٢.٨٢٦	٠.٠٠٤٠
الصوديوم	٣٥	٤.٩٢٦	٠.٠٠٥٤
الصلب الطري	١٢	١٣.٨٠	٠.٠٠٤٥
الرصاص	٨	٢١.٤	٠.٠٠٤٠

٣ - تحدّ من كمية المادة المشبّعة للورق في كابلات العوازل الورقية، وهذا يساعد على الحد من مشكلة نزيف تلك المادة من مكان إلى آخر داخل الكابل، كما سيأتي توضيحه بالتفصيل فيما بعد.



شكل ٢ ـ ١ الموصلات المجدولة في كابلات القوى

توجد عدة تكوينات مختلفة من الموصلات النحاسية المجدولة تنتجها مصانع الكابلات. ينشأ عن عملية الجدل زيادة في القطر الكلي للكابل يعطي الجدول ٢ـ٢ النسبة في هذه الزيادة. لتعيين قطر الكابل ذي الموصل المجدول

أوجد حاصل ضرب المعامل المناظر من الجدول في قطر موصل مصمت له نفس مساحة مقطع الموصل المجدول.

جدول ٢-٢ معاملات تعيين قطر الكابلات ذات الموصلات المجدولة

عدد الجدائل	٣	٧	١٢	١٩	٣٧	٦١	٩١	١٢٧ وأكثر
المعامل	١,٢٤٤	١,١٣٤	١,١٩٩	١,١٤٧	١,١٥١	١,١٥٢	١,١٥٣	١,١٥٤



شكل ٢ - ٢ تقليل أبعاد الكابل بتشكيل الموصل

تستعمل في بعض الأحيان موصلات نحاس مكون من أسلاك مقصدرة Tinned. تعمل طبقة القصدير الخارجية الرقيقة الموجودة في السلك النحاسي كحاجز لمنع التفاعلات الكيماوية بين بعض مكونات العوازل المطاطية ونحاس

الموصل. نلاحظ من الجدول ٢-١ أن مقاومية هذا النوع من الموصلات أعلى قليلاً من النحاس المخمر.

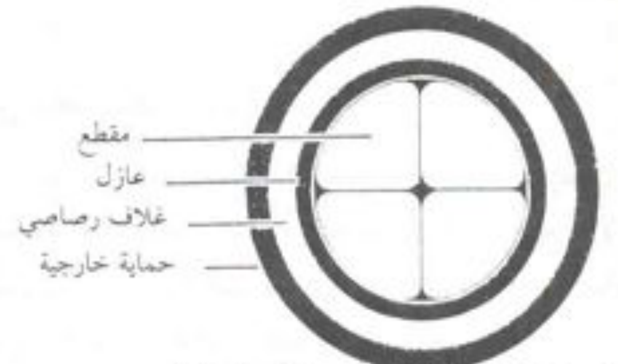
٢ . موصلات الألومنيوم Aluminium conductors

رغم أن الألومنيوم له عدة عيوب فنية بالمقارنة بالنحاس، إلا أنه يمكن في كثير من الأحيان التجاوز عن معظم أو ربما كل هذه العيوب أو حتى الاحتياط لها. ذلك بسبب المكسب المتحصل من رخص ثمن الألومنيوم. يحتاج موصل من الألومنيوم إلى ١,٦ من مساحة موصل نحاسي للحصول على نفس التوصيل الكهربي. إن هذا يعني استخدام كميات أكبر من مواد العزل والغلاف والتسليح الخارجي لكابلات الألومنيوم. وقد وُجد أن استخدام موصلات الألومنيوم في الكابلات المعزولة بالورق ذات الغلاف الرصاصي لا يحقق أي وفر في الوزن الكلي للكابل. كما توجد بعض العوامل الأخرى الواجب أخذها في الاعتبار عند المقارنة بين موصلات النحاس وموصلات الألومنيوم مثل جهد الكابل وقدرة حمل التيار وهبوط الجهد. ويمكن بصفة عامة اعتبار أن مقنن كابل موصل الألومنيوم يساوي ٧٠-٨٠٪ من مقنن كابل موصل نحاسي له نفس الحجم. لا تضاف عادة أي سبائك لمادة موصل الألومنيوم، ويشترط تبعاً لمعظم المواصفات (BS-2627 و BS-3988 مثلاً) على ألا تقل نسبة نقاوة الألومنيوم عن ٩٩,٥٪.

إن أحد العيوب الأساسية في موصلات الألومنيوم هو تكون طبقة رقيقة صلدة من الأكسيد على سطح الموصل. رغم أن هذه الطبقة تهيء حماية معقولة ضد تآكل الموصل، إلا أنها تتسبب في العديد من المشاكل خصوصاً عند عمليات اللحام والتوصيل والتثبيت لنهايات الكابل. يوجد العديد من الطرق الفنية للتخلص من تلك الطبقة. وتجدر الإشارة هنا إلى وجوب اتباع النشرات الفنية الخاصة بلحام وتوصيل وتثبيت نهايات كابلات الألومنيوم. ويمكن الحصول على تلك النشرات من مصانع الكابلات نفسها. كما أن استخدام موصلات الألومنيوم في كابلات التسليك المرنة Wiring cables غير مرغوب فيه حيث نلجأ في كثير من الأحيان إلى تثبيت موصل السلك بواسطة

مسمار من الصلب مما ينشأ عن ذلك وصلة ذات مقاومة عالية يتبعها سخونة وربما عُطل في الوصلة. جدير بالذكر أن تكاليف عمل الوصلات ونهايات الكابل من صناديق نهايات وتثبيت وخلافه أكبر في كابلات الألومنيوم عنها في كابلات النحاس، كما أنها تحتاج إلى حجم أكبر.

رغم كل ما سبق، تستعمل موصلات الألومنيوم على نطاق واسع في كابلات القوى نظراً لرخص ثمنها وتوافر الألومنيوم على المستوى العالمي. تستعمل عادة موصلات دائرية مصمتة حتى ٣٠٠مم٢ بينما تستعمل موصلات دائرية ذات أربعة مقاطع للأحجام الأكبر من ذلك كما في شكل ٢-٣. يسمح هذا التكون بانحناء الكابل وتحمله للاجهادات الميكانيكية العادية. يُستعمل كذلك موصلات دائرية مجدولة عند الحاجة إلى انحناء أكبر حيث يوجد مثل هذه الموصلات حتى حجم ١٠٠٠مم٢. كما يوجد كابلات ذات موصلات الومنيوم مشكلة مصمتة ومجدولة.



شكل ٢ ـ ٣ موصل الومنيوم دائري ذو أربعة مقاطع

رغم أن الألومنيوم المخمر كلياً يعطي توصيلية جيدة، إلا أنه طري جداً ويسبب مشاكل كثيرة في عمليات التوصيل والنهايات. يستخدم الومنيوم من نصف صلد إلى ٣/٤ صلد ($\frac{1}{2}$ H → $\frac{3}{4}$H).

يجب التأكد بصفة عامة من وجود حماية لموصلات الألومنيوم من التآكل Corrosion ويجب تغطية الموصل دائماً بطبقة حماية خارجية. كما تجدر الإشارة إلى أن الألومنيوم له مقاومة ممتازة للتآكل في الأجواء الجافة فقط داخل المباني. ونظراً لأن الجفاف التام غير مضمون فيجب عدم استخدام موصلات

الومنيوم عارية في أي مكان بل يجب تغطيتها بطبقة حماية خارجية.

٢ . موصلات الألومنيوم الملبسة بالنحاس

Copper-clad aluminium conductors:

هي عبارة عن قلب موصل من الألومنيوم عليه طبقة سميكة من النحاس ملتصقة به تماماً حيث يتم تلبيسها على موصل الألومنيوم باستعمال رابطة فلذية. إن الغرض الأساسي من التلبيس النحاسي هو التغلب على المشاكل الناجمة عن عمل وصلات ميكانيكية مع الألومنيوم. يمكن استخدام هذا النوع من الموصلات بنفس طريقة استخدام الموصلات النحاسية. يستخدم هذا النوع من الموصلات على نطاق محدود في بعض الدول مثل الولايات المتحدة والهند حتى مساحة ١/١٠مم² للسلك المصمت و١٠مم² للموصلات المجدولة، وينحصر استخدامه في الاستعمالات المنزلية والتمديدات الصغيرة. كما لا يستعمل في كابلات القوى حيث لم يلق إقبالاً حتى الآن في هذا المجال.

قياس حجم السلك Wire size

يقصد بحجم السلك مساحة مقطعة عادة. إتفقت معظم الدول على قياس مساحة مقطع الموصل بالمللي متر المربع، إلا أن بعض المنتجين الرئيسيين للكابلات وخصوصاً في الولايات المتحدة واليابان ما زال يستخدم بعض المقاييس الخاصة وأهمها ما يأتي:

أ ـ المقياس الأمريكي للسلك American wire gage AWG: يستخدم هذا المقياس أداة قياس خاصة لتعيين رقم يدل على مساحة مقطع السلك. تبدأ هذه الأرقام للأسلاك المستعملة في كابلات القوى من 20 AWG وتصل إلى رقم (٤/٠) وهو أكبر مقطع يُستعمل فيه هذا المقياس.

ب ـ المِلْ الدائري Circular mil: وهو وحدة مساحة تساوي مساحة دائرة قطرها مِلْ واحد One mil. والمِل يساوي ٠,٠٠١ من البوصة، أي ٠,٠٢٥٤ مللي متر. ويمكن استخدام علاقتي التحويل الآتيتين:

1 mil = 0.0254 mm.

1000 Circular mil = 1 MCM = 0.5067 mm^2.

يبين الجدول ٢ـ٣ العلاقات بين المقياس الأمريكي للسلك AWG والألف مل دائري MCM والمللي متر المربع.

جدول ٢ـ٣ أحجام الموصلات بالوحدات المختلفة

حجم السلك AWG أو MCM	مساحة المقطع Cir. mils	مساحة المقطع مم^٢
٢٠	١٠٢٤	٠,٥١٩
١٨	١٦٢٠	٠,٨٢٣
١٦	٢٥٨٠	١,٣١
١٤	٤١١٠	٢,٠٨
١٣	٥١٩٧	٢,٦٣
١٢	٦٥٣٠	٣,٣١
١١	٨٢٢٧	٤,١٧
١٠	١٠٣٨٠	٥,٢٦
٩	١٣٠٨٠	٦,٦٣
٨	١٦٥١٠	٨,٣٧
٧	٢٠٩١٢	١٠,٦
٦	٢٦٢٤٠	١٣,٣
٥	٣٣١٤٣	١٦,٨
٤	٤١٧٤٠	٢١,٢
٣	٥٢٦٢٠	٢٦,٧
٢	٦٦٣٦٠	٣٣,٦
١	٨٣٦٩٠	٤٢,٤
٠/١	١٠٥٦٠٠	٥٣,٥
٠/٢	١٣٣١٠٠	٦٧,٤
٠/٣	١٦٧٨٠٠	٨٥,٠
٠/٤	٢١١٦٠٠	١٠٧

ثانياً العــازل Insulator

المواد المستعملة للعزل في كابلات القوى الكهربية هي الورق والمواد المؤلفة بمضاعفة الأصل (المواد البوليمرية) والمطاط وقماش الكتان المورنش والأسبستوس.

١ . عازل الورق المشبع Impregnated-paper insulation

يتميز عازل الورق المشبع بأن له أعلى شدة إجهاد كهربي Breakdown strength وأكبر هامش معول Reliability بالإضافة إلى أطول عمر افتراضي بين جميع المواد المستعملة كعوازل في الكابلات. تصنع الكابلات المعزولة بالورق على الأنواع الآتية:

أ ـ عازل مصمت النوع	Solide-type insulation
ب ـ مملوء بالغاز تحت ضغط منخفض	Low-pressure gas-filled
جـ ـ مملوء بالغاز تحت ضغط متوسط	Medium-pressure gas-filled
د ـ مملوء بالزيت تحت ضغط مرتفع	High-pressure oil-filled
هـ ـ مملوء بالزيت تحت ضغط منخفض	Low-pressure oil-filled
و ـ مملوء بالغاز تحت ضغط مرتفع	High-pressure gas filled

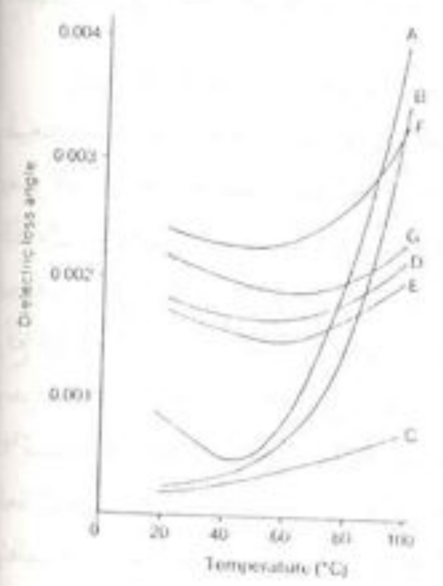
بدأ استخدام الورق كعازل في الكابلات منذ أواخر القرن الماضي ولا يزال يستخدم بنجاح تام حتى الآن. يستخدم العازل الورقي على شكل شريط ذي طبقتين أو ثلاث طبقات وذلك تبعاً لجهد الكابل. ويتراوح سمك الورق من ٦٥ إلى ١٩٠ ميكرومتر تقريباً وتتراوح كثافته من ٦٥٠ إلى ١٠٠٠ كجم/متر^{٣}.

يتراوح السمك الكلي للعازل الورقي في الكابلات من ٠,٦مم وحتى ٣٠مم تبعاً لجهد الكابل. كما أن المشاكل التي تظهر نتيجة لزيادة سمك العازل وخاصة أثناء عمليات ثني الكابل تحد من إمكانية زيادة سمك العازل. يجب الاهتمام جيداً بعملية تشطيب العازل الورقي وكذلك قدرة الشد وسمك الشريط حيث يجب زيادتهما على السطح الخارجي للعازل وذلك لاعتبارات ميكانيكية،

بينما يُستخدم ورق أقل سمكاً وذو شدة كهربية أعلى بالقرب من سطح الموصل وذلك للحصول على خواص كهربية أفضل كما سيأتي ذكره في الباب الخامس. ويتم لف موصل الكابل بشريط العازل الورقي حتى الحصول على السمك الكلي المطلوب لعازل الكابل.

رغم أن الورق يمتاز بخواص كهربية جيدة وهو في الحالة الجافة إلا أن طبيعته المسامية تجعله شديد الامتصاص للرطوبة. للتغلب على هذه المشكلة يغمر الورق بعد تجفيفه تحت الحرارة والتفريغ في مركب خاص من مشتقات البترول. ويجب ألا يزيد محتوى الرطوبة في الورق عن ٠,٠١ إلى ٠,٠٥٪ تبعاً لجهد الكابل. يضاف إلى زيت التشبيع مادة راتنجية في حدود ٢٠٪ بغرض رفع لزوجة الزيت في ظروف درجات حرارة التشغيل للحد من نزوح الزيت وحركته داخل العازل علاوة على رفع الشدة الكهربية للعازل ومنحه مقاومة أكبر للأكسدة. لا تكفي عملية إضافة المادة الراتنجية لمنع نزوح الزيت داخل العازل من الأجزاء المرتفعة إلى الأجزاء المنخفضة من الكابل بعد تركيبه، وتظهر هذه المشكلة بوضوح في الكابلات الرأسية، تؤدي هذه الظاهرة إلى انخفاض شدة عزل الكابل في الأجزاء المرتفعة منه نتيجة لهجرة الزيت منها، بينما يؤدي تسرب الزيت إلى الأجزاء المنخفضة إلى إجهادات ميكانيكية زائدة على غلاف الكابل قد تؤدي إلى انفجاره (يجب على المهندس مراعاة تلك الظاهرة جيداً عند استعمال كابلات عوازل ورقية في وضع رأسي أو في طرق شديدة الانحدار). ولقد تم التغلب على هذه المشكلة في السنوات الأخيرة بإنتاج نوع من مادة التشبع تعرف باسم «الكتلة المشبعة غير النازحة» (MIND) Mass-impregnated Non-draining وتتكون من الزيت وبعض أنواع الشمع المتبلر مع بعض المواد الأخرى. تتميز هذه المادة بأنها تكون سائلة وقابلة لتشبيع العازل أثناء غمره ثم تتحول بالتبريد البطيء إلى مادة صلبة لينة تظل في مكانها بعد ذلك بصرف النظر عن وضع الكابل. رغم أن هذه المادة لا يظهر فيها مشكلة النزح في أحوال التحميل العادية للكابل إلا أنه يجب ملاحظة أن الحرارة الزائدة المستمرة الناتجة من تجاوز الحمل قد تسبب سيولتها وظهور مشكلة النزح مرة أخرى.

يبين الشكل ٢-٤ علاقات نمطية لزاوية فقد العازل δ مع درجة الحرارة لأنواع مختلفة من كابلات العازل الورقي. ويعطي الجدول ٢-٤ السماحية النسبية ϵ_r Relative permittivity لمواد العزل والتشبيع المستعملة.



A - مركب زيت/راتنج
B - مركب MIND
C - زيت كابلات مملوءة بالزيت
D - ورق للكابلات المصمتة
E - ورق للكابلات المملوء بالزيت
F - ورق مشبع للكابلات المصمتة
G - ورق مشبع للكابلات المملوءة بالزيت

شكل ٢ - ٤ خصائص نمطية للعلاقة بين زاوية الفقد ودرجة الحرارة

جدول ٢ - ٤ السماحية النسبية لمواد العزل (ϵ_r)

المادة	٢٠°م	١٠٠°م
مركب الزيت مع الراتنج	٢,٥	٢,٤
الكتلة المشبعة غير النازحة MIND	٢,٤	٢,٢
الكابلات المملوءة بالزيت	٢,٢	٢,٠٠
الورق المشبع		
- كثافة منخفضة	٣,٣	٣,٣
- كثافة مرتفعة	٣,٨	٣,٨

الفقاقيع الغازية Void formation

تنشأ الفقاقيع الغازية (أو الهوائية) في عازل الكابل إما نتيجة لعيب في الصناعة وإما لعيب في مادة العازل نفسه. كما أن دورة الحمل أثناء خدمة الكابل Loading cycle لها تأثير على تكوين تلك الفقاقيع.

يجب أخذ العناية التامة أثناء عملية تصنيع الكابل لتجنب أي فقاقيع أو احتمال تكوّن تلك الفقاقيع فيما بعد. ويجب لذلك إجراء عملية تشبيع العازل الورقي بمنتهى العناية، ويجب أن يترك ليبرد تماماً قبل عملية تغطية الكابل بالغلاف.

إن دورة تحميل الكابل لها تأثير واضح على تكوين الفقاقيع الغازية. فعندما ترتفع درجة حرارة الكابل أثناء التحميل الثقيل Heavy loads تتمدد مكونات الكابل ولكن بمعدلات مختلفة حيث يضغط العازل على غلاف الكابل الخارجي بسبب كبر معامل التمدد الحراري للعازل. بعد ذلك، وعند تخفيف الحمل تنخفض درجة حرارة الكابل فينكمش العازل وكذلك ينكمش الغلاف ولكن بمعدل مختلف تاركاً وراءه فراغات غازية أو هوائية وهي ما تسمى بالفقاقيع. يمكن أن تتكون تلك الفقاقيع إما في العازل أو في مادة حشو الكابل للكابلات عديدة القلوب. وتؤدي تلك الفقاقيع إلى زيادة في معامل قدرة الكابل بالأضافة إلى حدوث تأين داخل مادة الكابل مما يؤثر على شدة العزل الكهربي وزيادة مفقودات الكابل.

الأنواع الخاصة من كابلات العوازل الورقية

إن الكابلات التي أشرنا إليها حتى الآن تسمى الكابلات المصمتة Solid cables، حيث لا يوجد بها أي وسيلة لمنع تكون فقاعات غازية Voids وكذلك تحلل مواد العزل. تستعمل هذه الكابلات بطريقة حسنة حتى جهد ٣٣ ك ف، أما على الجهود الأعلى من ذلك (٦٦ ك ف وأكبر) فإن الإجهاد الكهربي مع وجود فقاعات غازية يؤدي إلى حدوث إنهيار كهربي يبدأ في الفقاعات نظراً لضعف شدتها الكهربية. يتم معالجة هذه المشكلة بالوسائل المختلفة الآتية:

أ - يتم تشبيع العازل الورقي بزيت منخفض الكثافة، ويُزوّد الكابل بقنوات للزيت داخل الموصل المجدول بجانب القلب المعزول حتى لا تكون هناك فرصة لتكوين فقاقيع أو جيوب غازية وذلك تحت الضغط المستمر.

ب - التأثير بضغط خارجي على الكابلات المصمتة بحيث لا تتكون الفقاقيع أثناء تغير دورة الحمل.

جـ - إدخال غاز خامل مثل النيتروجين تحت ضغط (منخفض أو مرتفع) بين العازل والغلاف الرصاصي.

يجب أن يكون الورق المستخدم في مثل هذه الكابلات أكثر مسامية حتى تزيد درجة تشبعه بالزيت أو الغاز المستخدم.

٢ . عوازل المواد المؤلفة بمضاعفة الأصل (المواد البوليمرية)

Polymeric materials

المواد البوليمرية هي مواد مستخرجة من صناعات البتروكيماويات. يطلق اسم المواد البوليمرية على الأنواع المختلفة من لدائن البوليمر والمطاط الصناعي.

تنقسم لدائن البوليمر (البلاستيك) إلى نوعين أساسيين:

i - اللدائن الحرارية Thermoplastics، وهي أنواع من اللدائن تلين بالحرارة وتصلد بالبرودة.

ii - الجوامد الحرارية Thermosets، وهي اللدائن التي لا تلين بالحرارة حتى درجة حرارة تحللها.

يمكن صناعياً تحويل العديد من اللدائن الحرارية إلى جوامد حرارية وذلك بإجراء معالجة خاصة عليها تسمى التشابكية Cross-linking.

أهم اللدائن الحرارية المستخدمة في صناعة الكابلات هي:

أ - البولي فينايل كلورايد PVC — Polyvinyl chloride

ب - البولي إيثيلين منخفض الكثافة LDPE — Low density polyethylene

جـ - البولي إيثيلين مرتفع الكثافة HDPE — High density polyethylene

د ـ البولي بروبيلين PP — Polypropylene

هـ ـ مطاط الإيثيلين بروبيلين EPR — Ethylene propylene rubber

أهم الجوامد الحرارية المستخدمة في صناعة الكابلات هي:

أ ـ المطاط السيليكوني SR — Silicone rubber

ب ـ مطاط الأيثيلين بروبيلين الناشف HEPR — Hard ethylene propylene rubber

حـ ـ البولي إيثيلين التشابكي XLPE — Crosslinked Polyethylene

يبين الجدول ٢ـ٥ أهم الخواص الكهربية للبوليمرات، ويبين الجدول ٢ـ٦ أهم الخواص الميكانيكية والفيزيائية لها.

جدول ٢ـ٥ الخواص الكهربية للبوليمرات

المـــادة	المقاومية عند ٢٠°م (أوم متر)	السماحية النسبية ε_r عند ٥٠ هرتز	$\tan\delta$ عند ٥٠ هرتز
اللدائن الحرارية			
البولي فينايل كلورايد PVC	٢×١٠^{١١} ـ ١×١٠^{١٣}	٥ ـ ٧	٠,٠٧ ـ ٠,١٣
البولي إيثيلين منخفض الكثافة	١×١٠^{١٦}	٢,٣٥	٠,٠٠٠٣
البولي إيثيلين مرتفع الكثافة	١×١٠^{١٦}	٢,٣٥	٠,٠٠٠٦
البولي بروبيلين	١×١٠^{١٦}	٢,٢٥	٠,٠٠٠٥
الجوامد الحرارية			
مطاط الأغراض العامة	٢×١٠^{١٢}	٣ ـ ٤,٥	٠,٠١ ـ ٠,٠٣
مطاط مقاوم للحرارة	٧×١٠^{١٢} ـ ١×١٠^{١٣}	٣ ـ ٤	٠,٠١ ـ ٠,٠٢
مطاط مقاوم للحريق	١×١٠^{١٣}	٤ ـ ٥	٠,٠١٥ ـ ٠,٠٣٥
مطاط سيليكوني	٢×١٠^{١٢}	٢,٩ ـ ٣,٥	٠,٠٠٢ ـ ٠,٠٢
مطاط الإيثيلين بروبيلين الناشف	٢×١٠^{١٣}	٣,٢	٠,٠١
البولي إيثيلين التشابكي	١×١٠^{١٤}	٢,٣ ـ ٥,٢	٠,٠٠٠٤ ـ ٠,٠٠٥

جدول ٢ـ٦ الخواص الميكانيكية والفيزيائية للبوليمرات

المـــادة	أقل قدرة للشد Tensile strength (N/mm²)	الاستطالة عند الكسر٪	حدود درجة الحرارة °م المقتن	التركيب
اللدائن الحرارية				
البولي فينايل كلورايد	١٢,٥ - ١٨,٥	١٢٥	٧٠	صفر
البولي ايثيلين منخفض الكثافة	٧	٣٠٠	٧٠	— ٦٠
البولي ايثيلين مرتفع الكثافة	٣٧	٥٠٠	٨٠	— ٤٠
البولي بروبيلين	٣٧	٤٠٠	٨٠	— ١٠
الجوامد الحرارية				
مطاط الأغراض العامة	٥	٢٥٠	٦٠	— ٤٥
مطاط مقاوم للحرارة	٤,٢	٢٠٠	٨٥	— ٤٥
مطاط مقاوم للحريق	٥,٥	٢٠٠	٨٥	— ٣٠
مطاط سيليكوني	٥	١٥٠	١٥٠	— ٥٥
مطاط الإيثيلين بروبيلين الناشف	٨,٥٠	٢٠٠	٩٠	— ٤٠
البولي ايثيلين التشابكي	١٢,٥	٢٠٠	٩٠	— ٤٠

أ ـ اللدائن الحرارية:

بـدأت محاولات استخـدام اللدائن الحراريـة في الثـلاثينـات من هـذا القرن، وقد تمت تجـربة أول كـابل معـزول بمادة PVC في ألمـانيا في ذلـك الوقت، إلا أنه لم يتم إنتاج واستعمال عوازل PVC إلا في أواخر الخمسينات.

أ ـ البولي فينايل كلورايد PVC

يتميز PVC بخواص كهربية ممتاز عند الجهود المنخفضة وكذلك درجات الحـرارة المنخفضة، وهـو يستعمـل كعـازل جيـد في الكـابـلات حتى جهـد ٣,٣ ك ف، إلا أنه يصبح غير مناسب للجهـود الأكبر من ذلـك حيث ترتفـع مفقودات العزل بسبب ارتفاع قيمة ثابت العزل. من الملاحظ أيضاً أن مقاومية PVC تتغير تغيراً شديداً مع درجة الحرارة مما يجعله عند درجات حرارة مرتفعة

غير مناسب بالمرة حيث تهبط مقاومية العازل عند ٧٠°م إلى ألف مرة من قيمتها عند ٢٠°م. علاوة على ذلك فإن PVC يلين بالحرارة ويصلد بالبرودة، ولهذا يجب ألا يتعرض لدرجات حرارة مستمرة تزيد عن ٧٠°م أو تقل عن ٠°م، كما يجب ألا تزيد درجة حرارة الموصل عن ١٥٠-١٦٠°م أثناء فترة القصر وإلا تلف العازل. تختص مادة PVC بخاصية الإطفاء الذاتي للهب. فهو يحترق عندما يلامس اللهب مباشرة ثم ينطفىء عند إبعاد مصدر اللهب، إلا أنه يُنتج غازات سامة وحاته عند اشتعاله.

أمكن في السنوات الأخيرة إنتاج أنواع أخرى من مادة PVC بهدف تحسين خواصها الكهربية والحرارية، حيث أمكن إنتاج مادة PVC يمكن تشغيلها على جهود أعلى من ٣,٣ ك ف ودرجات حرارة أعلى. تُستخدم مثل هذه الأنواع من PVC كغلاف لعازل من مادة جامدة حرارياً حيث تتعرض لدرجات حرارة عالية. علاوة على ذلك فقد أمكن إنتاج أنواع خاصة من مادة PVC تحتفظ بمرونة معقولة حتى - ٤٠°م. جدير بالذكر أن معظم المستهلكين لا يزالون يفضلون استخدام الجوامد الحرارية على PVC في مثل تلك الظروف الخاصة.

تشترط المواصفة (ICE - 502) أنه عند استخدام البوليمرات في الكابلات على جهود أعلى من ٣ ك ف يجب أن يقل حاصل الضرب (ϵ_r . tan δ) عن ٠,٧٥ بين درجة حرارة ٨٥°م ودرجة حرارة الوسط. إن السبب في ذلك هو أنه عند تعرض الكابل لجهد U_n بتردد f وهو غير محمل فإن العازل يسخن نتيجة لمفقودات العزل حتى وإن كان الكابل غير محمل.

إن أقصى درجة حرارة مستمرة يمكن أن يتحملها عازل PVC المستعمل في كابلات الجهد المنخفض (حتى ٣,٣ ك ف) هي ٧٠°م. بعد هذه الدرجة يصبح PVC غير مستقر حرارياً نظراً للانخفاض الحاد في مقاومته والارتفاع الشديد في زاوية فقد العازل δ حيث ينتج عن ذلك زيادة مضطردة في درجة حرارة العازل تنتهي بالتلف التام للكابل. أما بالنسبة لكابلات PVC المستعملة على جهود أعلى من ٣,٣ ك ف فيمكن لمادة العازل أن تعمل بطريقة سليمة حتى درجة حرارة ٨٠°م تقريباً.

ب ـ البولي بروبيلين PP

يتميز البولي بروبيلين بأن درجة حرارة إنصهاره تزيد عن ١٦٠°م، وهي درجة حرارة عالية بالمقارنة بالبولي إيثيلين. إلا أنه لم يستعمل بكثرة في صناعة الكابلات حتى الآن.

حـ ـ البولي إيثيلين PE

يوجد نوعان أساسيان من البولي إيثيلين، بولي إيثيلين مرتفع الكثافة HDPE وبولي إيثيلين منخفض الكثافة LDPE. إن الخواص الكهربية للبولي إيثيلين أقل بصفة عامة من البولي فينايل كلورايد، ولذا فهو لا يستعمل كعازل عادة على نطاق واسع في صناعة الكابلات. ينحصر استخدام HDPE تقريباً في مواد الحماية الخارجية للكابل.

يتأثر البولي إيثيلين بالتصاقه مع موصلات النحاس وستائر الكابل المعدنية نتيجة للأكسدة الناتجة في المعدن، ولذا يجب استعمال مانع للأكسدة عند استعماله كعازل في الكابل. تتراوح درجة إنصهار البولي إيثيلين منخفض الكثافة من ١٠٠°م إلى ١١٥°م ويبدأ في اللين من ٨٠°م إلى ٩٠°م. ولهذا يجب ألا يتعرض لدرجة حرارة مستمرة تزيد عن ٧٠°م. يلين البولي إثيلين مرتفع الكثافة عند درجة حرارة أعلى من ١١٥°م.

د ـ النايلون Nylon

يُعتبر النايلون من اللدائن الحرارية الصلبة نوعاً ما، إلا أنها مادة قاسية Tough جداً، كما يتميز بمقاومته الشديدة للاحتكاك بالمواد الأخرى كما أنه لا يلين حتى حوالي ٢٠٠°م.

يستخدم النايلون في صناعة بعض الكابلات الخاصة عندما تكون هناك حاجة لمثل تلك الخواص السابق ذكرها.

يمكن صناعة بعض اللدائن الحرارية على شكل شريط أو خيط. ويستخدم البولي بروبيلين في صناعة الخيوط العازلة، كما تستخدم مشتقات

البولي إيثيلين كشريط للربط في الكابلات عديدة القلوب.

ii. الجوامد الحرارية:

يوجد نوعان مختلفان من الجوامد الحرارية يستخدمان في صناعة الكابلات، المواد المطاطية التي تتميز بمرونة ذاتية وبعض الخصائص مثل مقاومة الزيوت، والمواد المعرضة للعملية التشابكية Crosslinking التي تكسب المادة مقاومة أكبر لدرجات الحرارة المرتفعة.

أ ـ المطاط Rubber

يستعمل المطاط الطبيعي المستخرج من الأشجار على نطاق ضيق الآن في صناعة الكابلات. وخواصه بصفة عامة أقل من خواص المواد البوليمرية حيث أقصى حرارة تشغيل له حوالي ٦٠°م.

يعتبر مطاط البتيل Butyl rubber من أشهر أنواع المطاط الصناعي، وقد استخدام على نطاق واسع في صناعة كابلات السفن نظراً لمقاومته للزيوت والشحوم التي تكون موجودة عادة داخل السفن، كما استخدم مطاط البتيل (IIR) في كابلات الجهد العالي بسبب مقاومته العالية لغاز الأوزون والعوامل الجوية بصفة عامة. إلا أنه قد استحدثت في الفترة الأخيرة أنواع أخرى تتميز على مطاط البتيل وبدأ استعماله في الانحسار.

يستخدم مطاط الإيثيلين بروبيلين كمادة عازلة وكحماية خارجية للكابلات وخصوصاً تلك التي تعمل على جهود أعلى من ٣ ك ف. وهو يتميز بأن له خواصاً كهربية ممتازة وكذلك بمقاومة عالية لغاز الأوزون مما جعله مناسباً في كابلات الجهد العالي، إلا أنه قابل للاشتعال مثل المطاط الطبيعي. يلزم لذلك تزويد الكابلات المعزولة بمادة EPR بوسيلة حماية خارجية.

ب ـ البولي إيثيلين التشابكي XLPE

ربما تكون مادة XLPE هي أشهر الجوامد الحرارية على الإطلاق المستعملة الآن في صناعة الكابلات، كما أن مادة PVC هي أشهر اللدائن

الحرارية. يتم تركيب المادة على موصل الكابل عن طريق البثق Extrusion وهي في الحالة اللدنة عند درجة حرارة مرتفعة، ثم تُعرّض المادة لعدة عمليات كيماوية يتسبب عنها تغيير في التركيب الجزيئي لها مما ينتج عنه مادة مرنة قاسية لا تلين بعد ذلك بارتفاع درجة الحرارة.

يستعمل XLPE كعازل في الكابلات حتى درجة حرارة مستمرة للموصل تصل إلى ٩٠°م. كما أن العازل يمكن أن يتحمل درجات الحرارة العالية الناشئة عن تيارات القصر والتي تصل إلى ٢٥٠°م وذلك لفترة زمنية قصيرة لحين عمل أجهزة الحماية الخاصة بالكابل.

نظراً لارتفاع الشدة الكهربية لمادة XLPE فقد استخدمت بنجاح في كابلات نقل القوى الكهربية لجهود تزيد كثيراً عن ٦٦ ك ف، إلا أنه يجب الأخذ في الاعتبار أن فترة عمل تلك الكابلات لم تتجاوز العشر سنوات في أغلب الحالات ولذلك فهي ما زالت في مرحلة التجربة وجمع المعلومات الخاصة بها أثناء وبعد عمليات تركيبها ووضعها في الخدمة.

٣ . عازل الكتان المورنش Varnished-cambric insulation :

وهو في الواقع عبارة عن نسيج من القطن (وليس الكتان) على شكل شريط يلف لولبياً على الموصل بعد تشبيعه من على جانبيه بمادة الورنيش العازلة ثم يتم لفه على الموصل بعد ذلك. كما تضاف مادة زيتية أثناء اللف للمساعدة في عمليات ثني الكابل، وكذلك فإن هذه المادة تملأ جميع الفراغات مما يساعد على تحسين خواص العزل.

يتميز عازل الكتان المورنش بمرونة أكبر من العوازل الورقية إلا أنها أقل من عوازل المطاط، كما أن له مقاومة معقولة للرطوبة ولذلك فهو يستعمل في بعض الأحيان بدون غلاف خارجي.

٤ . الأسبستوس Asbestos

وهو من المواد المقاومة للحرارة إلى حد كبير، إلا أنه لا يستعمل على جهود أكثر من ٨٠٠٠ فولت نظراً لضعف خواصه الكهربية. يستخدم

الاسبستوس بمفرده كعازل للكابل على شكل ألياف، وتُشبع تلك الألياف أحياناً بمادة مقاومة للحريق، كما توجد أنواع أخرى من الكابلات يستخدم فيها الأسبستوس مع عازل الكتان المورنش على هيئة شريط يلف حلزونياً على الموصل.

ثالثاً: الغلاف المعدني Metallic sheathing

يُعتبر الغلاف المعدني أمراً ضرورياً في كابلات العوازل الورقية حيث يزوِّد العازل الورقي بحماية ميكانيكية معقولة كما يمنع دخول الماء إليه. لا توجد مثل هذه الضرورة في بعض الكابلات الأخرى مثل كابلات العوازل البوليمرية. تشترط المواصفة (IEC-502) على ضرورة وجود غلاف معدني للكابلات في الجهود الأعلى من ١ ك ف. يراعى في تصنيع الكابل أن يلتصق الغلاف المعدني تماماً مع الطبقة الخارجية للعازل. يمكن وضع الغلاف على عازل كل موصل من موصلات الكابل أو على مجموعة عوازل الموصلات كلها أو الطريقتين معاً. يجب أن يكون غلاف الكابل متصلاً كهربياً كوحدة واحدة. يمنح الغلاف توصيلاً أرضياً للكابل بحيث يصبح جهد الغلاف مساوياً للصفر وجهد الموصل يكون مقاساً بالنسبة للغلاف. يُستخدم الغلاف المعدني غالباً لحمل تيار الخطأ الأرضي للكابل في حالة حدوث مثل الخطأ، ويلزم لذلك أن تكون توصيلية غلاف الكابل كبيرة. يُستعمل كلاً من الرصاص وسبائك الرصاص والألومنيوم وسبائك الألومنيوم في صناعة الغلاف.

يتميز الرصاص بسهولة الصنع ومقاومته للتآكل إلا أن خواصه الميكانيكية ضعيفة، يستعمل لذلك بعض سبائك الرصاص لتحسين الخواص الميكانيكية للغلاف.

أمكن استخدام الألومنيوم في صناعة غلاف الكابل حيث أنه أقوى من الرصاص. ولكن نظراً لارتفاع شدة معدن الألومنيوم الميكانيكية فإنه يكون من الصعب التعامل معه خصوصاً عند عمليات ثني الكابل. علاوة على ذلك فإن الاجهادات الميكانيكية الشديدة الناتجة عن التمدد الحراري في الكابل تؤثر

تأثيراً سيئاً على وصلات الكابل في حالة استخدام غلاف أملس من الألومنيوم. تم التغلب على هذه المشكلة باستخدام غلاف الومنيوم معرج Corrugated يمكنه إمتصاص وتحمل تلك الإجهادات بطريقة أفضل من الغلاف الأملس.

جدير بالذكر أنه من المسموح به استخدام كابلات ذات جهد أعلى من ١ ك ف بدون غلاف معدني أو أي غطاء معدني آخر وذلك في بعض الأغراض الخاصة مثل الموصلات الهوائية المعزولة. كما يمكن استخدام مثل هذه الكابلات على مستوى سطح الأرض إذا وُضعت داخل مجرى بعيداً عن المواد المعدنية المؤرضة.

رابعاً: الحماية الميكانيكية - التسليح Armouring

تُزود كابلات القوى عادة بحماية ميكانيكية لحمل تيار الخطأ الأرضي ولإعطاء الكابل بعض الحماية الميكانيكية ضد الإجهادات التي يتعرض لها أثناء عمليات النقل والتركيب، وكذلك بعد وضعه في الخدمة حيث يكون معرضاً للوقوع تحت أحمال كبيرة كمرور السيارات وخلافه. يُستعمل عادة طبقتان من شرائط الصلب الطري بسمك يتراوح من ٠,٥مم إلى ٠,٨مم تبعاً لقطر الكابل، وتدهن الشرائط بالبيتومين. توفر هذه الشرائط حماية معقولة للكابل ضد الأحمال الواقعة عليه أثناء خدمته، إلا أن هذه الحماية تكون غير كامله إذا كان الكابل مدفوناً على عمق أقل من نصف متر من سطح الأرض. ولقد وُجد أن استخدام شرائط الصلب للحماية الميكانيكية يجعل الكابل غير مناسب من حيث قدرته على تحمل إجهادات الشد كما يجعله غير مرن عند عملية ثني الكابل.

توجد خبرة أخرى لعملية تسليح الكابل وهي استخدام أسلاك من الصلب المجلفن أو من سبيكة مكونة من النحاس والسيليكون والمنجنيز. تستخدم كذلك أسلاك وشرائط الألومنيوم في عملية التسليح. ويمكن القول بصفة عامة أن عملية تسليح الكابل هي خبرة فنية خاصة بكل دولة أو شركة تقوم بتصنيع الكابلات.

خامساً: الحماية الخارجية Oversheath

الحماية الخارجية للكابل هي طبقة من مادة لها خواص معينة توضع فوق الغلاف أو فوق طبقة تسليح الكابل بحيث تكون طبقة الحماية الخارجية هي آخر طبقة خارجية للكابل لحمايته من البيئة والمواد المحيطة به. المواد المستخدمة عادة في طبقة الحماية الخارجية هي ما يأتي:

أ۔ الجوت المشبع بالبيتومين.

ب ـ البولي فينايل كلورايد

جـ ـ بعض الجوامد الحرارية عند الحاجة لمقاومة ارتفاع درجة الحرارة ومقاومة الزيت وتبطيء اللهب Heat, Oil Resistance, Flame Retardant (HOFR).

تُزود معظم الكابلات الآن بحماية خارجية. ويجب إعطاء اهتمام خاص بالنسبة للكابلات ذات الغلاف الألومنيوم. ويلزم عمل حماية دقيقة للألومنيوم ضد التآكل والعوامل الجوية ومواد البيئة بصفة عامة. تعمل هذه الحماية للغلاف ولمناطق اللحام والتوصيلات ونهايات الكابلات. وقد لوحظ أن تآكل الألومنيوم يبدأ على شكل ثقوب صغيرة في غلاف الكابل سرعان ما تتغلغل إلى داخله وتسبب تلفاً سريعاً للكابل. وتجدر الإشارة هنا إلى وجوب ملاحظة أن وجود معادن أخرى مدفونة تحت الأرض لها أنودية للألومنيوم مثل النحاس والرصاص يساعد على تسارع عملية تآكل الألومنيوم المدفون في باطن الأرض. علاوة على ذلك، يجب مراعاة أن الكابلات المركبة فوق الأرض تكون هي الأخرى معرضة للتآكل بسبب الرطوبة والعوامل الجوية الأخرى خصوصاً عند نقط التثبيت.

إن من أهم المواد المستعملة للحماية الخارجية حتى الآن الجوت المشبع بالبيتومين، ويُستعمل غالباً فوق غلاف كابلات العوازل الورقية واللدائن الحرارية التي توضع بالبثق فوق غلاف كابلات العوازل البوليمرية وكذلك في جميع أنواع الكابلات. تتكون الحماية الخارجية للكابلات المسلحة من بطانة

تحت التسليح ثم طبقة أخرى فوق التسليح. يستعمل الجوت بنجاح عادة كنسيج تشبيع لحمل البيتومين، إلا أنه لا تفضل هذه الحماية في المناطق الحارة حيث يبلى الجوت بسرعة وينتج عن ذلك فساد مادة الحماية الخارجية. إن استخدام مادة PVC أصبح شائعاً على مستوى العالم حيث يتميز بخواص كيميائية جيدة ضد التآكل ومقاومة المواد الموجودة في التربة وكذلك المواد العضوية والغازية وغيرها. يظهر ذلك بوضوح في الجدولين ٢ - ٧ و ٢ - ٨. إلا أنه يجب الاحتياط جيداً عند عملية تركيب الكابل حيث أن PVC مادة طرية يمكن أن يحدث بها شرخ أو كسر عند اصطدامها بأي مادة صلبة مثل وقوع حجر على الكابل أثناء تركيبه. عند الحاجة إلى مادة أقسى للحماية الخارجية تستعمل مادة البولي إيثيلين عالي الكثافة HDPE، حيث يمكن لهذه المادة تحمل أي صدمة ميكانيكية دون أن تتأثر بها. العيب الوحيد لهذه المادة أنها صلدة لا تساعد في عمليات ثني الكابل ولذلك تستخدم في الكابلات الهوائية المعزولة.

وأخيراً يجب مراعاة إجراء الاختبار اللازم بعد وضع الكابل للتأكد من أنه لم يحدث أي شروخ أو تلف فيه أثناء عملية التركيب. يمكن إجراء هذه الاختبار تبعاً للمواصفة (IEC-229) أو كما هو مبين في الباب السابع.

جدول ٢-٧ مقاومة المواد البوليمرية للكيماويات غير العضوية

المادة الكيماوية / البوليمر		PVC	PE	XLPE	راتنج فلوري	مطاط فلوري	مطاط سيليكوني	EPR	مطاط نيتريل	نيوبرين PCP	هيبالون CSP
بخار حمض النيتريك		هـ	د	د	ب	حـ	هـ	هـ	هـ	هـ	د
حمض نيترك	مركز	د	هـ	هـ	أ	ب	د	د	هـ	هـ	د
	١٠٪	حـ	ب	ب	أ	ب	حـ	حـ	هـ	هـ	ب
حمض كبريتيك	مركز	د	حـ	حـ	أ	ب	هـ	هـ	هـ	هـ	حـ
	١٠٪	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	ب
حمض الهيدروكلوريك	مركز	حـ	أ	أ	أ	أ	حـ	ب	هـ	د	ب
	١٠٪	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	د	ب	ب
حمض الفسفوريك		أ	أ	أ	أ	أ	ب	أ	هـ	أ	أ
حمض الخليك	مركز	د	ب	أ	أ	أ	ب	ب	حـ	ب	ب
	٣٪	ب	أ	أ	أ	أ	أ	أ	د	د	أ
ماء نشادر	مركز	ب	أ	أ	أ	أ	ب	ب	حـ	حـ	ب
	١٠٪	ب	أ	أ	أ	أ	ب	ب	حـ	حـ	أ
صودا كاوية	٤٠٪	د	أ	أ	أ	أ	ب	ب	أ	حـ	أ
	١٠٪	ب	أ	أ	أ	أ	ب	ب	أ	د	أ
غاز الكلور		هـ	هـ	هـ	أ	حـ	د	هـ	هـ	هـ	هـ
بروم		هـ	هـ	هـ	أ	حـ	د	هـ	هـ	هـ	هـ
أوزون المخفف (لا يتعدى ٠,٠٣٪)		أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	د	ب	أ

(ملحوظة): أ : لا يتأثر.

ب : يتأثر بنسبة ضئيلة.

حـ: يتلف قليلاً ويفضل عدم تعرضه.

د : يتأثر بمضي الوقت ويجب عدم تعرضه.

هـ : يتأثر بشدة ويسبب التلف.

جدول ٢-٨ مقاومة المواد البوليمرية للزيوت والمذيبات

الزيت أو المذيب / البوليمر	PVC	PE	XLPE	راتنج فلوري	مطاط فلوري	مطاط سيليكوني	EPR	مطاط نيتريل	نيوبرين PCP	هيبالون CSP
البنزين	ب	ب	ب	أ	حـ	و	هـ	هـ	هـ	هـ
الهيكسان	جـ	ب	ب	أ	أ	هـ	هـ	أ	حـ	حـ
النفتا	جـ	ب	ب	أ	ب	هـ	هـ	د	هـ	و
الجازولين	حـ	ب	ب	أ	ب	هـ	هـ	أ	حـ	د
الكلوروفورم	د	ب	ب	أ	د	هـ	هـ	ز	و	ز
تتراكلوريد الكاربون	أ	ب	ب	أ	حـ	و	هـ	حـ	و	ز
الأسيتون	د	أ	أ	أ	حـ	حـ	أ	و	أ	أ
جليكول الأيثيلين	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ
الجلسرين	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ
الكحول الإيثيلي	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ	أ
الأنيلين	ب	ب	ب	أ	أ	أ	ب	ز	د	ب
زيت ASTM رقم ١	أ	أ	أ	أ	أ	أ	حـ	أ	أ	أ
زيت ASTM رقم ٢	أ	أ	أ	أ	أ	أ	حـ	أ	أ	أ
زيت ASTM رقم ٣	أ	أ	أ	أ	أ	ب	هـ	أ	ب	ب
زيت المحولات	أ	أ	أ	أ	أ	ب	هـ	أ	ب	حـ
الزيت السيليكوني	أ	أ	أ	أ	أ	حـ	أ	أ	أ	أ
الزيوت النباتية	أ	أ	أ	أ	أ	أ	ب	أ	أ	أ
الأثير البترولي	هـ	أ	أ	أ	و	و	هـ	حـ	د	حـ
فريون ١٢	أ	أ	أ	أ	د	هـ	هـ	حـ	هـ	د
الزيت الثقيل	ب	ب	ب	أ	أ	د	هـ	أ	حـ	د

(ملحوظة) : أ : لا يتأثر

ب : يتأثر بنسبة ضئيلة

حـ : يذوب بنسبة ضئيلة ولكن دون ضرر

د : يذوب بنسبة محسوسة ويجب عدم الاستعمال إلا في الحالات الخاصة

هـ : يذوب ويجب عدم الاستعمال

و : يذوب بشدة

ز : يذوب ويتحلل

إن أشهر الجوامد الحرارية المستعملة للحماية الخارجية في الكابلات المقاومة للحرارة والزيوت وإبطاء اللهب هي ما يأتي:

i ـ المطاط السيليكوني (SR)، ويتميز بمقاومته الممتازة لدرجات الحرارة العالية حتى ١٨٠°م، إلا أن خواصه الميكانيكية ضعيفة ولذلك يضاف إليه بعض المواد للتقوية.

ii ـ مطاط الكلوروبرين (CR, PCP)، ويستعمل عند الحاجة إلى مادة مرنة قاسية.

iii ـ مطاط البولي إيثيلين الكلوري المكبرت (CSP) وله مقاومة ممتازة للزيوت وغاز الأوزون والعوامل الجوية.

iv ـ المطاط الفلوري وهو مقاوم جيد للزيوت على درجات الحرارة العالية.

الاصطلاحات الأمريكية للمواد البوليمرية المستعملة في الكابلات

تشير صناعات الكابلات الأمريكية للمواد البوليمرية المستعملة في الكابلات والتي تحقق المواصفات الموضوعة من (Underwriters Laboratories) وهي هيئة إختبارات أمريكية، بواسطة حروف بيانها كالتالي:

i ـ Type T للعوازل المناسبة للاستعمال في الأماكن الجافة فقط.

ii ـ Type TW, THW, THWN للعوازل المقاومة للرطوبة ويمكن إستعمالها في الأماكن المعرضة للمياه. والنوعان THW, THWN مقاومان للرطوبة وكذلك للحرارة حتى درجة حرارة للموصل تصل إلى ٧٥°م.

iii ـ Type TBS وهو من عوازل اللدائن الحرارية وبه ألياف خارجية مبطئة للهب، ويستخدم في لوحات التوزيع فقط.

iv ـ Type TA وهو خليط من عازل اللدائن الحرارية والاسبستوس ويستخدم أيضاً في لوحات التوزيع فقط.

v ـ Type MTW وهو مقاوم للرطوبة والحرارة والزيوت، ويستخدم حتى درجة حرارة ٦٠°م في الأماكن الرطبة و٩٠°م في الأماكن الجافة.

vi ـ Type THHN وهو مشابه لنوع THWN إلا أنه غير مقاوم للرطوبة.

vii ـ Type XHHW وهو من مادة XLPE وتستعمل حتى ٧٥°م في الأماكن المبللة بالماء وحتى ٩٠°م في الأماكن الجافة.

viii ـ Types FEB, FEPB ويحتويان على عازل الأيثلين بروبيلين الفلوري ويستعملان في الأماكن الجافة حتى درجة حرارة ٩٠°م وحتى ٢٠٠°م في بعض الحالات الخاصة.

سادسا: الحشو Fillers

تستخدم مادة الحشو في معظم الكابلات عديدة القلوب. الهدف من عملية الحشو هو ملء الفراغات بين الموصلات للحصول على تكوين مصمت دائري للكابل ككل. المواد المستعملة في الحشو هي الجوت والقطن والأسبستوس والمطاط والورق.

الكابلات المعزولة بالورق

Paper Insulated Cables

رغم الانتشار الواسع، منذ أوائل السبعينات، في استعمال الكابلات ذات العوازل البوليمرية، إلا أن استعمال الكابلات المعزولة بالورق ما زال شائعاً على نطاق كبير في كثير من الدول وخصوصاً في انجلترا وبعض الدول الأوروبية. يتميز عازل الورق المشبع بشدة انهيار كهربي Breakdown strength عاليه كما أن أعطاله قليلة بالإضافة إلى طول عمره الافتراضي وخواصه الجيدة في الأداء.

توجد كابلات العازل الورقي على إحدى التكوينات الآتية:

١ ـ كابلات مصمتة، وهي التي لا يكون فيها أية وسيلة للتحكم في المادة المشبعة سواء من ناحية حركتها داخل الكابل أو ضغطها وذلك بعد عملية تركيب الكابل وتشغيله.

٢ ـ الكابلات المملوءة بالزيت، وهي كابلات ذات عازل ورقي ولكنها مزوده بوسائل للتحكم في ضغط وحركة زيت التشبيع بحيث يمكنه أن يملأ أي فراغ أو فقاعة غازية أو شروخ داخل الكابل.

٣ ـ كابلات الغاز المضغوط، وفيها يوضع العازل في وسط غاز خامل مثل النيتروجين تحت ضغط وذلك لتحقيق نفس الغرض المطلوب من الكابلات المملوءة بالزيت.

الكابلات المصمتة Solid Cables

تستعمل الكابلات المصمتة ذات العازل الورقي (الكابلات الورقية) حتى جهد ٣٣ ك ف بنجاح تام. وهي إما كابلات ذات قلب واحد Single-Core Cables أو كابلات عديدة القلوب (إثنين أو ثلاثة أو أربعة عادة) Multi-Core Cables.

كابلات القلب الواحد

إن التركيب النمطي للكابل ذي القلب الواحد يتكون من موصل دائري مجدول من أسلاك النحاس أو الألومنيوم. يُلف حول الموصل شريط من عازل الورق المشبع بحيث يكون اللف بطريقة حلزونية على الموصل مع ترك فجوة بين كل لفة والتي تليها في نفس الطبقة وذلك حتى لا تتداخل اللفات في بعضها أثناء ثني الكابل مما يسبب تلف العازل. يتراوح عرض شريط اللف الورقي عادة من ١٢ إلى ٢٨مم، وتتم عملية اللف في عدة طبقات فوق الموصل حتى الحصول على السمك الكلي المطلوب للعازل.

يُغطى العازل الورقي بعد ذلك بغلاف معدني من الرصاص أو الألومنيوم أو سبائك الألومنيوم ثم يزود الكابل بحماية خارجية من مادة البولي فينايل كلوريدا PVC عادة.

يبين الشكل ٣ـ١ المكونات الأساسية للكابل الورقي ذي القلب الواحد

الكابلات عديدة القلوب

ذكرنا في الباب الأول أن استخدام الكابلات عديدة القلوب يؤدي بصفة عامة إلى خفض تكاليف الإنشاء سواء للكابل أو لمجاري الكابلات، كما أن أداءه أفضل من حيث الهبوط في الجهد بالمقارنة بكابلات القلب الواحد.

الأنواع الأساسية من الكابلات ثلاثية القلوب هي ما يأتي:

أ ـ الكابل ذو الشريط Belted type cable



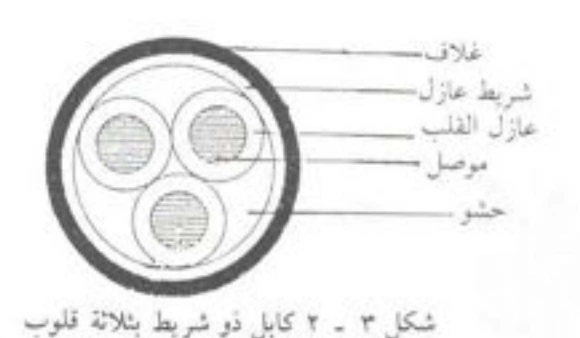
شكل ٣ ـ ١ كابل ذو عازل ورقي ٦٠٠/١٠٠٠ فولت قلب مفرد (٣٠٠مم٢)

ب ـ الكابل ذو الستارة Screened type cable

حـ ـ كابلات SL و SA بالستارة SL, SA Screened type

د ـ كابلات HSL

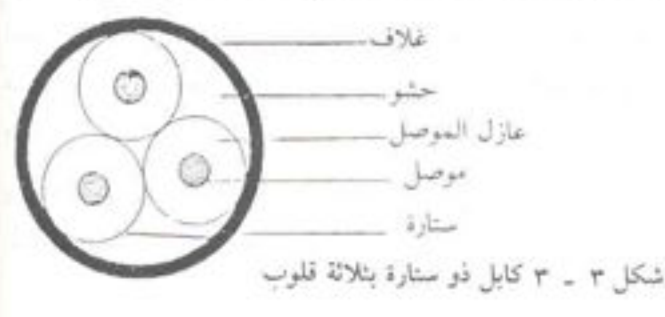
بدأت صناعة الكابلات الورقية ثلاثية القلوب بصناعة الكابل ذي الشريط. يتكون الكابل من ثلاثة موصلات معزولة عن بعضها بحيث يكون لكل موصل العازل الخاص به. يلف الموصلات الثلاثة معاً بعد ذلك بشريط (حزام) Belt من الورق العازل ويُملأ الفراغ المتكون بعازل من الورق أو الجوت. يوضع كل هذا التكوين بعد ذلك داخل غلاف معدني. يبين الشكل ٣ـ٢ المكونات الأساسية لهذا النوع من الكابلات.



شكل ٣ ـ ٢ كابل ذو شريط بثلاثة قلوب

مع ارتفاع جهد التشغيل في الكابلات في أوائل هذا القرن، بدأت تظهر بعض العيوب الفنية والمشاكل في الأداء الخاص بالكابلات ذات الشريط. ظهرت هذه العيوب على صورة ضعف شديد وسريع مع إنهيار في خواص العزل. يرجع ذلك إلى شكل توزيع المجال الكهربي داخل الكابل حيث توجد مركبة للمجال الكهربي في الاتجاه المماس للعازل مع تغير في مقادير واتجاهات تلك المركبة للقلوب الثلاثة مع الزمن كما سيأتي شرحه فيما بعد في الباب الخامس. أدت تلك المركبة المماسة للعازل إلى عدم قدرة الكابلات ذات الشريط على العمل بكفاءة على الجهود العالية (٣٣ك ف)

اقترح هوخستادتر Hochstadter عام ١٩١٤ استعمال طبقة رقيقة من المعدن على هيئة ستارة Screen توضع على عازل كل قلب كما هو مبين بالشكل ٣-٣. يعرف هذا النوع من الكابلات أحياناً باسم H-type نسبة إلى مكتشفه. الستارة المستعملة الآن عبارة عن طبقة رقيقة من الألومنيوم المثقب أو شريط رقيق مثقب من النحاس يُلف على العازل مع ترك فجوة صغيرة بين كل لفة والتي قبلها. يمنع وجود هذه الستارة تكوين المركبة المماسة للمجال الكهربي حيث يلزم أن يكون اتجاه المجال الكهربي عمودياً على سطح الستارة



شكل ٣ ـ ٣ كابل ذو ستارة بثلاثة قلوب

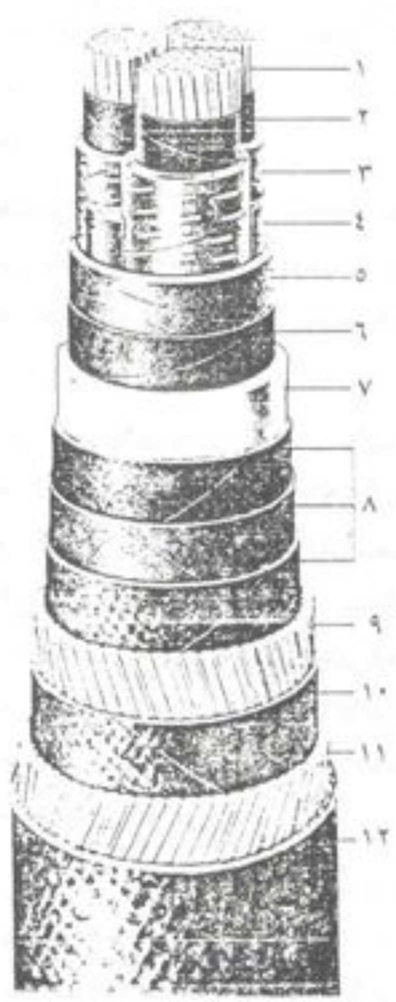
المعدني وبالتالي عمودياً على سطح العازل الملاصق لـه. ويراعى أن تكـون الستارة ملتصقة جيداً مع العازل وكذلك متصلة إتصالاً كهربياً مع الغلاف ومع ستارتي القلبين الآخرين. أمكن بذلك استعمال كابلات العوازل الورقية ذات الستارة على جهود عالية.

تجدر الإشارة هنا إلى أنه من الأنسب استخدام الكابـلات ذات الشريط للجهود ١١ ك ف وأقل وذلك لبساطة تكوينها وسهولة تركيبهـا والتعامـل معها ورخص ثمنها بالمقارنة بالكابلات ذات الستارة التي تستعمل للجهود الأعلى من ١١ ك ف عادة.

تم إنتاج نوعين من الكـابلات ذات المجـال الإشعاعي Radial همـا SL و SA. يطلق الرمز SL إختصاراً للتعبير Sheath-lead والرمز SA إختصاراً للتعبير Sheath-aluminium. في هذين النوعين يوضع غلاف منفصل من الرصاص أو الألومنيوم على عازل كل قلب بحيث يصبح الكابل كما لو كان ثـلاثة كـابلات منفصلة كل منها عبارة عن كابل أحادي القلب. يؤدي هذا التكوين إلى تجنب المفقودات المغناطيسية الناشئة في مادة تسليح الكابلات الأخرى. وعلى ذلك يفـاضل كثيـر من مستعملي الكابـلات بين استخدام كـابـلات أحـاديـة القلب وكابلات عديدة القلوب من نوعي SL و SA.

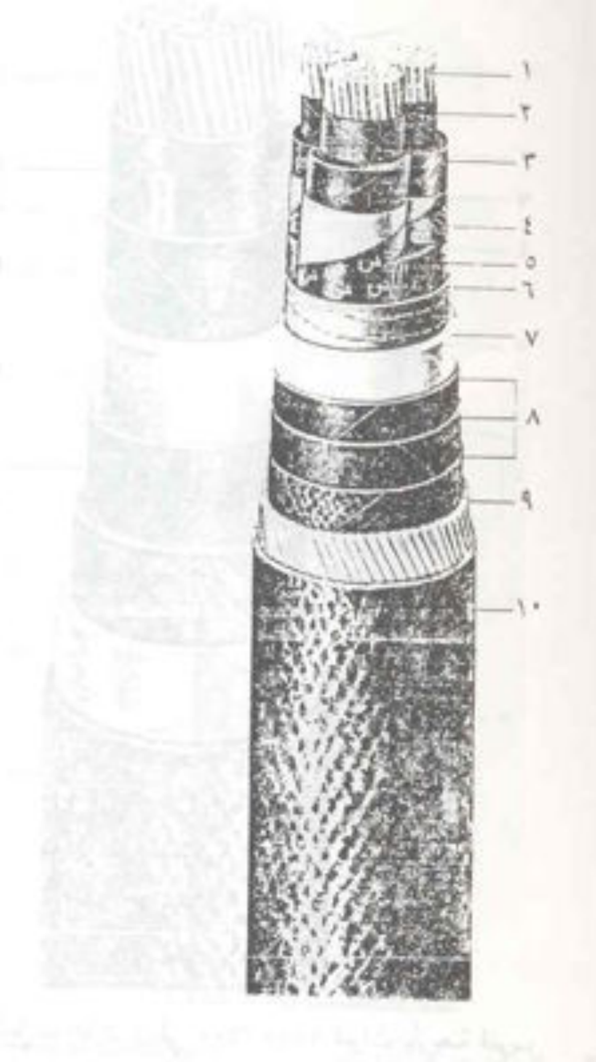
في الكابلات من نوع HSL يغطّى عازل كل قلب بستـارة تحت الغلاف الخاص به ثم يوضع الجميع داخل غلاف خارجي للكابل كله. ويجب مراعاة الاتصـال الكهربي الجيـد بين غلاف كـل موصـل والآخـر وكـذلـك بين أغلفة الموصلات والغلاف الخارجي للكابل.

تبين الأشكال من ٣-٤ إلى ٣-١٠ بعض النماذج لأنواع الكابلات الورقية عديدة القلوب السابق ذكرها. نلاحظ في تلك الأشكال أن موصلات كابـلات ١١ ك ف وأكبر يتم لفّها عادة بطبقتين من ورق الكربون شبه الموصل أو الورق المعدني وذلك قبل وضع العازل. إن هذا يعمل ستارة واقية للموصل يخفض شدة الإجهاد الكهربي على سطح التلامس بين الموصل والعازل.



شكل ٣ ـ ٤ كابل ذو عازل ورقي ١١ ك ف بثلاثة قلوب من النوع ذي الشريط (١٥٠مم^{2}).

١ ـ موصل مجدول مشكل
٢ ـ ستارة ورق كربوني
٣ ـ عازل ورق مشبع
٤ ـ حشو
٥ ـ شريط ورق مشبع
٦ ـ ستارة ورق كربوني
٧ ـ غلاف رصاصي
٨ ـ بطانة
٩ ـ تسليح من سلك الصلب المجلفن
١٠ ـ فاصل
١١ ـ تسليح من سلك الصلب المجلفن
١٢ ـ الحماية الخارجية



شكل ٣ ـ ٥ كابل ذو عازل ورقي ١١ ك ف بثلاثة قلوب من النوع ذي الستارة (١٥٠مم٢).

١ ـ موصل مجدول مشكل

٢ ـ ستارة ورق كربوني

٣ ـ عازل ورق مشبع

٤ ـ ستارة معدنية

٥ ـ حشو

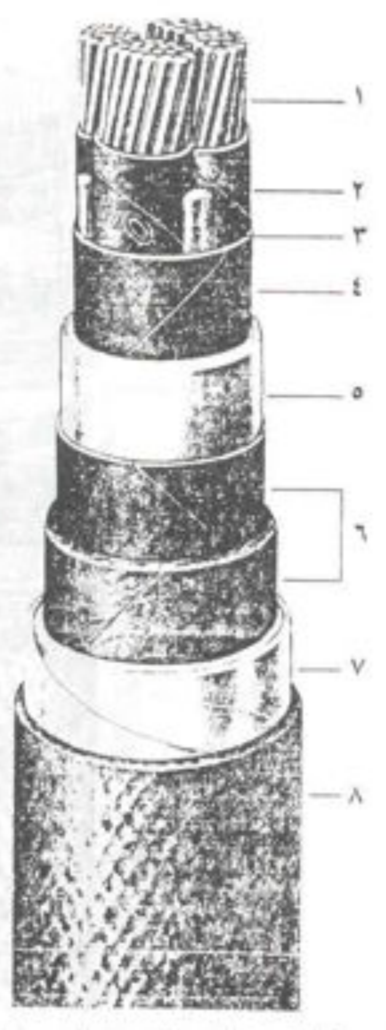
٦ ـ شريط نحاسي

٧ ـ غلاف رصاصي

٨ ـ بطانة

٩ ـ تسليح من سلك الصلب المجلفن

١٠ ـ الحماية الخارجية



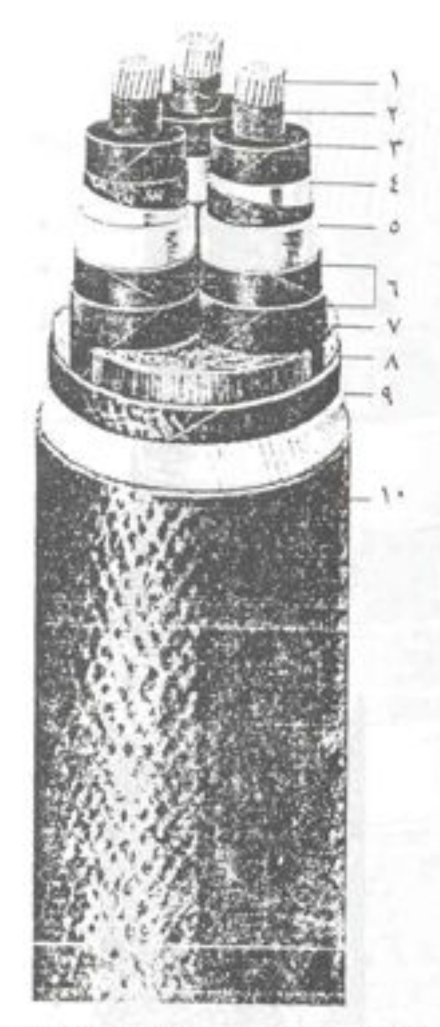
شكل ٣ ـ ٦ كابل ذو عازل ورقي ٦٠٠/١٠٠٠ فولت بأربعة قلوب من النوع ذي الشريط (٧٠مم٢)

١ ـ موصل مجدول مشكل
٢ ـ عازل ورق مشبع
٣ ـ حشو
٤ ـ شريط ورقي مشبع
٥ ـ غلاف رصاصي
٦ ـ بطانة
٧ ـ تسليح من شرائط الصلب
٨ ـ الحماية الخارجية



شكل ٣ ـ ٧ كابل ذو عازل ورقي ٦٠٠/١٠٠٠ ڤولت بأربعة قلوب ألومنيوم مصمتة من النوع ذي الشريط (٧٠مم^{2})

١ ـ موصل الومنيوم مصمت
٢ ـ عازل ورق مشبع
٣ ـ حشو
٤ ـ شريط ورق مشبع
٥ ـ غلاف رصاصي أو سبيكة رصاص
٦ ـ بطانة
٧ ـ تسليح من شرائط الصلب
٨ ـ الحماية الخارجية



شكل ٣ ـ ٨ كابل ذو عازل ورقي ٣٣ك ف ثلاثة قلوب من نوع SL (١٥٠ مم^{2})

١ ـ موصل مجدول دائري
٢ ـ ستارة ورق كربوني
٣ ـ عازل ورق مشبع
٤ ـ ستارة من شريط معدني
٥ ـ غلاف رصاص أو سبيكة رصاص
٦ ـ حماية القلب
٧ ـ حشو جوت
٨ ـ شريط بطانة
٩ ـ تسليح من سلك الصلب المجلفن
١٠ ـ الحماية الخارجية



شكل ٣ ـ ٩ كابل ذو عازل ورقي من نوع (CONSAC) بثلاثة قلوب الومنيوم مصمتة وشريط

١ ـ موصل الومنيوم مصمت
٢ ـ عازل ورق مشبع
٣ ـ غلاف الومنيوم
٤ ـ الحماية الخارجية (PVC)



١ ـ موصل مجدول
٢ ـ غلاف الومنيوم معرج
٣ ـ الحماية الخارجية (PVC)

شكل ٣ ـ ١٠ كابل ذو عازل ورقي وغلاف الومنيوم معرج

إعتبارات عامة

عند استعمال الكابلات المصمتة المعزولة بالورق يراعى ما يأتي:

١ ـ ألا تزيد الحدود القصوى لدرجة حرارة موصل الكابل عن تلك الواردة بالجدول ٣ـ١ .

جدول ٣ـ١ الحدود القصوى لدرجة الحرارة في الكابلات المعزولة بالورق

الجهد ك ف	تكوين الكابل	التشغيل المستمر م°	تجاوز الحمل م°	فترة القصر م°
١/٠,٦ - ٣,٣/١,٩ - ٦,٦/٣,٨	شريط	٨٠	١٠٠	٢٠٠
٦,٣٥ - ١١	شريط	٦٥	٨٠	٢٠٠
١١/٦,٣٥ - ١٥/٨,٧	ستارة	٧٠	٨٥	٢٠٠
٢٢/١٢,٧ - ٣٣/١٩	ستارة	٦٥	٨٠	١٠٠

٢ ـ ألا تقل أنصاف الثني عن تلك الواردة في الباب السابع.

٣ ـ ألا تزيد قوة سحب الشد أثناء عمليات التركيب عن تلك الواردة بالجدول ٣ـ٢.

٤ ـ إجراء الاختبارات الخاصة بالكابلات الورقية والتي تُجرى بعد عملية الانشاء و بعد عملية التشغيل، كما هو مبين في الباب السابع.

جدول ٣ـ٢ أقصى قوى سحب للكابلات الورقية جهد ١١ ك ف

حجم الموصل م²	غلاف أملس (نيوتن)	غلاف معرج بماسك للغلاف (نيوتن)	غلاف معرج بدون ماسك للغلاف (نيوتن)
٠٩٠	٥٩٠٠	٦٩٠٠	٤٠٠٠
١٥٠	٧٩٠٠	٩٨٠٠	٥٤٠٠
١٨٥	٩٨٠٠	١١٨٠٠	٦٤٠٠
٢٤٠	١٣٧٠٠	١٤٧٠٠	٧٩٠٠
٣٠٠	١٥٦٠٠	١٩٦٠٠	٩٨٠٠

٥ ـ الاهتمام الخاص بالكابلات الرأسية والموضوعة في وضع مائل وإجراء الاختبارات الدورية عليها. تستعمل كابلات الكتلة المشبعة غير النازحة MIND فقط للكابلات الرأسية.

الكابلات المعزولة بالمواد البوليمرية

Polymeric Materials Insulated Cables

إن أكثر المواد شيوعاً في كابلات العوازل البوليمرية هي ما يأتي:

١ ـ البولي فينايل كلورايد PVC

٢ ـ البولي إيثيلين التشابكي XLPE

٣ ـ العوازل المطاطية وتشمل مطاط البتيل ومطاط الأيثيلين بروبيلين EPR.

تُعتبر الكابلات المعزولة بمادة PVC هي الاختيار الأفضل في جميع أنحاء العالم وذلك حتى جهد ٣,٣ ك ف. ورغم وجود كابلات معزولة بعازل PVC مصممة خصيصاً للعمل حتى جهود تصل إلى ٢٠ ك ف، إلا أنها لم تلق إقبالاً طيباً من المستهلكين حيث يفضل عليها الكابلات ذات الأنواع الأخرى من العوازل مثل XLPE والعوازل المطاطية.

لم يتسبب عن استعمال كابلات PVC منذ الخمسينات وحتى الآن أي مصاعب أو مشاكل في التشغيل العادي. إلا أنه لوحظ أن المادة تفقد قدراً من لدونتها نتيجة لتعرضها المستمر لدرجات الحرارة المرتفعة والناتجة من سخونة الموصل. تُلاحظ تلك الظاهرة جيداً عند نهايات الكابلات وصناديق التوصيل. ورغم ذلك فإن تلك المشكلة لم تسبب أية متاعب بشرط مراعاة عدم تعرض الكابل للحركة الشديدة أو النقل من مكانه.

ذكرنا في الباب الثاني أن مادة PVC تتأثر تأثراً شديداً بارتفاع درجات الحرارة وفترة تعرضها لذلك الارتفاع. يجب ـ نتيجة لذلك ـ مراعاة تلك

الخاصية بعدم تعريض الكابل لتجاوزات شديدة في الحمل Overloading أو لفترات قصر طويلة نسبياً. ننصح في هذا المجال بالاهتمام بمراجعة ضبط أجهزة الحماية عند استعمال كابلات PVC ومقارنتها بمقدرة تحمل تيار القصر (يمكن الاستعانة بالبيانات الواردة في الباب السادس في هذا الشأن). قد يستدعي الأمر إما زيادة حجم الكابل أو خفض مقننه. وعلى أية حال فإن هذا الموضوع لا يمكن إعتباره مشكلة كبيرة.

تصنع كابلات PVC بموصلات نحاسية وموصلات الومنيوم. وتكون الموصلات النحاسية مجدولة عادة بينما تكون موصلات الألومنيوم مصمتة. كما تصنع تلك الكابلات إما وحيدة القلب أو عديدة القلوب.

يتحدد سمك العازل في كابلات PVC حتى جهد ٣ ك ف بالمتطلبات الميكانيكية كالأحمال الواقعة على الكابل وغير ذلك مثل عمليات الثني وارتفاع درجة الحرارة. أما للكابلات ذات الجهود الأعلى فيكون العامل المحدد هو العامل الكهربي.

تُزود كابلات PVC عادة بغلاف خارجي غير معدني وهو أيضاً من مادة PVC كما توجد أنواع منها مسلحة بأسلاك من الصلب عادة، على شكل طبقة أو طبقتي تسليح، وتوجد أنواع أخرى غير مسلحة.

تبين الأشكال من ٤ـ١ إلى ٤ـ٥ نماذج مختلفة من كابلات عوازل PVC.

يجب مراعاة الآتي جيداً عند استعمال كابلات PVC.

أ ـ لا يزيد حاصل ضرب السماحية × زاوية الفقد عن ٠,٧٥ بين درجة حرارة ٨٥°م ودرجة حرارة الوسط كما بينا ذلك في الباب الثاني.

ب ـ لا تزيد أقصى درجة حرارة تحميل مستمرة عن ٧٠°م

حـ ـ لا تزيد درجة الحرارة عن ١٢٠°م في فترات التحميل الزائد لحين عمل أجهزة الحماية

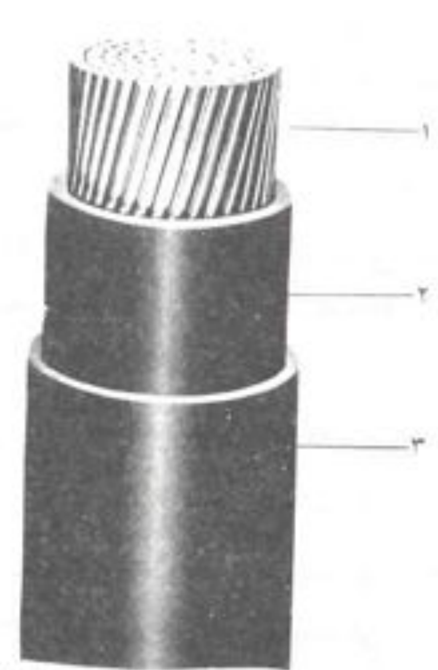
د ـ لا تزيد درجة الحرارة عن ١٦٠°م أثناء فترات قصر الدائرة.

نوصي بالرجوع إلى المعلومات الواردة في الباب السادس بخصوص تلك

الاعتبارات. كما نوصي بمراعاة ما يأتي بالنسبة لكابلات عوازل PVC وذلك أثناء عمليات التركيب وقبل الدخول في الخدمة.

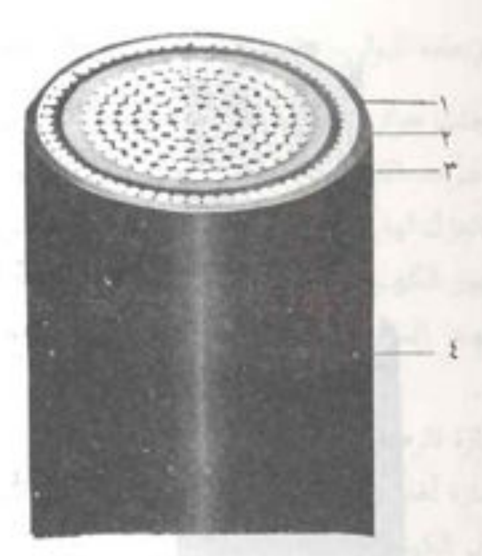
أ - يراعي ألا تتم عملية التركيب في الأجواء الباردة (حوالي صفر °م) لأن العازل يكون قصفاً Brittle في تلك الحال وسهل التعرض للشروخ مما يفقده قدرته على العزل.

ب - مراعاة أقل نصف قطر ثني مسموح به للكابل تبعاً لما هو وارد بالباب السابع.



شكل ٤ - ١ كابل ذو عازل PVC ٦٠٠/١٠٠٠ فولت بقلب واحد نحاسي مجدول (حتى ٦٣٠ مم^2)

١ - موصل نحاسي مجدول
٢ - عازل PVC
٣ - غلاف خارجي PVC



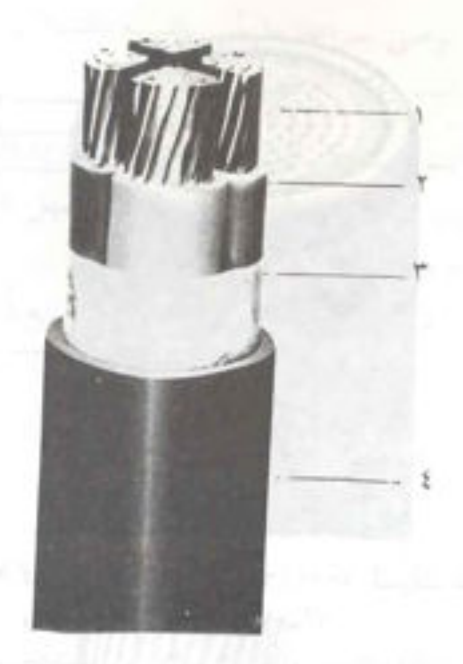
شكل ٤ ـ ٢ كابل ذو عازل PVC ‏٦٠٠/١٠٠٠ ڤولت مسلح بقلب واحد مجدول (حتى ٦٣٠مم^{2})

١ ـ موصل نحاسي مجدول
٢ ـ عازل PVC
٣ ـ تسليح من أسلاك الألومنيوم
٤ ـ غلاف خارجي PVC



شكل ٤ ـ ٣ كابل ذو عازل PVC ‏٦٠٠/١٠٠٠ ڤولت مسلح بأربعة قلوب (حتى ٤٠٠مم^{2})

١ ـ موصل نحاسي مجدول مشكل
٢ ـ عازل الموصل
٣ ـ بطانة
٤ ـ تسليح أسلاك الومنيوم
٥ ـ غلاف خارجي PVC



شكل ٤ ـ ٤ كابل ذو عازل PVC ٦٠٠/١٠٠٠ ڤولت غير مسلح بأربعة قلوب

١ ـ موصل مجدول مشكل
٢ ـ عازل الموصل PVC
٣ ـ بطانة
٤ ـ حماية خارجية PVC



شكل ٤ ـ ٥ كابل ذو عازل PVC ٦٠٠/١٠٠٠ ڤولت مسلح وبغلاف رصاصي

١ ـ موصل نحاسي مجدول مشكل
٢ ـ عازل الموصل PVC
٣ ـ عازل حراري ورابط
٤ ـ غلاف رصاصي
٥ ـ بطانة PVC
٦ ـ تسليح من أسلاك الصلب المجلفن
٧ ـ حماية خارجية PVC

تتميز مادة البولي إيثيلين التشابكي XLPE بالخواص الآتية:

أ - تتحمل درجات حرارة مرتفعة نسبياً سواء أثناء التحميل المستمر أو تجاوز الحمل أو فترات القصر.

ب - زاوية فقد العزل لها صغيرة بالمقارنة بمعظم مواد العزل الأخرى.

حـ - شدة الانهيار الكهربي لها تتراوح من ٥٠ إلى ٧٠ ك ف /مم وشدة إنهيار الجهد الدفعي Ipulse voltage لها تتراوح من ٨٠ إلى ١٦٠ ك ف/مم.

د - مقاومة ممتازة للرطوبة.

هـ - مقاومته ممتازة لغاز الأوزون المتكون من الكورونا الناشئة نتيجة لزيادة شدة المجال الكهربي في العازل.

و - مادة صلدة جداً، حيث تعتبر مادة XLPE أصلد العوازل المعروفة تقريباً.

أدت كل هذه الخواص السابقة إلى تفضيل استعمال كابلات XLPE للجهود الأعلى من ٣,٣ ك ف وحتى جهود تصل إلى ٢٧٥ ك ف. كما تستعمل كابلات XLPE للجهود الأقل من ٣,٣ ك ف إلا أن ثمنها أغلى من كابلات PVC.

يتم إنتاج كابلات XLPE عن طريق عملية البثق Extrusion، حيث يتم وضع طبقات الكابل المختلفة حول الموصل بهذه الطريقة. يخضع الكابل أثناء هذه العملية إلى عملية علاج تعرف باسم Curing يستعمل فيها إما بخار الماء أو غاز خامل مثل النيتروجين. تكتسب صناعة الكابل بهذه الطريقة ميزات أساسية له حيث تمنع إحتمال وجود شوائب أو فجوات هوائية أو رطوبة قد يتعرض لها الكابل أثناء التصنيع، كما تحقق عملية العلاج تجانساً في مواد الكابل وتقوى الرابطة بين طبقات الكابل وبعضها.

يجب مراعاة ما يأتي عند استعمال كابلات XLPE.

أ - لا تزيد أقصى درجة حرارة تحميل مستمر عن ٩٠°م للموصل.

ب - لا تزيد أقصى درجة حرارة تحميل زائد عن ١٣٠°م للموصل.

حـ - لا تزيد أقصى درجة حرارة عن ٢٥٠°م للموصل أثناء فترة القصر.

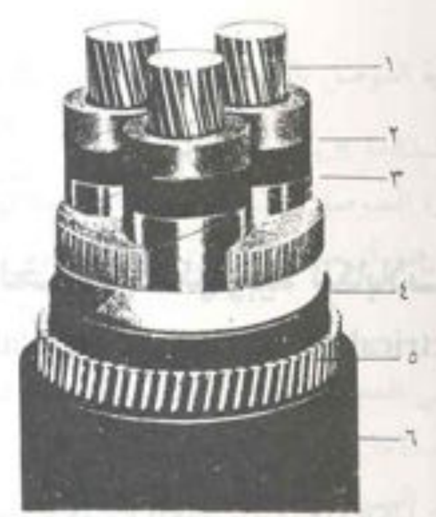
كما يراعى عند عمليات التركيب أن مادة XLPE مادة صلدة جداً مما يجعلها غير مناسبة للانحناءات الحادة، ونوصي بالرجوع إلى المعلومات الواردة في الباب السابع بهذا الشأن.

يُفضل عادة استخدام كابلات XLPE للجهود الأعلى من ٣,٣ ك ف وهي شائعة الاستعمال في منظومات التوزيع الأولى على جهد ١١ ك ف. ولا يختلف التركيب الأساسي لمكونات كابلات XLPE عنها في كابلات PVC، ويبين الشكل ٤-٦ أحد كابلات XLPE.

تستعمل كلاً من كابلات مطاط الإيثيلين بروبيلين ومطاط البتيل عند الحاجة لخواص معينة متوفرة فيهما، إلا أن الاتجاه السائد هو تفضيل استخدام XLPE في الأحوال العادية.

يجب مراعاة الآتي في كابلات العوازل البوليمرية بصفة عامة:

أ - لا تتم عملية التركيب في درجة حرارة صفر°م أو أقل للكابلات المعزولة بمادة PVC أو التي تستخدم تلك المادة كحماية خارجية.
ب - عندما توجد ضرورة لتركيب الكابل في درجات الحرارة الباردة جداً يجب إجراء عملية تسخين للكابل وقياس درجة حرارته بواسطة ترمومتر خاص قبل عملية تناوله.
حـ - يلاحظ أن عملية تسخين الكابل تستغرق ساعات طويلة ويجب أن تتم في غرفة آمنه وتحت إشراف دقيق.
د - يجب إجراء فحص دقيق للكابل بعد عملية التركيب كما هو موضح بالباب السابع.



شكل ٤ ـ ٦ كابل ذو عازل XLPE ١٢/٢٠ ك ڤ بثلاثة قلوب

١ ـ موصل مجدول مشكل
٢ ـ عازل XLPE
٣ ـ شريط نحاسي كغلاف للموصل
٤ ـ غلاف فاصل
٥ ـ تسليح من أسلاك الصلب المجلفن
٦ ـ الحماية الخارجية PVC

الخواص الكهربية للكابلات

Electrical Characteristics of Cables

يقصد بالخواص الكهربية للكابل ثوابت هذا الكابل مثل مقاومة الموصل ومقاومة العازل وسعة الكابل ومحاثته Inductance بالإضافة إلى بعض الخواص الأخرى مثل المجال الكهربي داخل الكابل وخلافه.

تختلف الخواص الكهربية في الكابل وحيد القلب عنها في الكابلات عديدة القلوب. رغم أن قيم هذه الكميات يجب أن تعطى في النشرات الفنية المصاحبة للكابل، إلا أننا سنقدم في هذا الباب الأساس العلمي لهذه الكميات حتى يمكن حسابها ومراجعتها عند الحاجة وكذلك لإمكان تفسير الظواهر المتعلقة بها.

أولاً: الكابل ذو القلب الواحد

١. مقاومة الموصل Conductor resistance

تعتمد مقاومة الموصل على نوع مادة الموصل أو على مقاومية الموصل. يعطي الجدول ٢ ـ ١ مقاومية المعادن المختلفة للتيار الثابت. لإيجاد مقاومة سلك طوله l متر ومساحة مقطعه A متر² نستخدم العلاقة

$$R = \rho \frac{l}{A} \text{ Ohm} \qquad (1\text{-}5)$$

حيث ρ هي مقاومية الموصل بالأوم متر و R مقاومته الكلية.

تتأثر قيمة المقاومة R بالعوامل الآتية:

أ - درجة حرارة الموصل، ويمكن استخدام العلاقة الآتية لتعيين قيمة المقاومة R_t عند أي درجة حرارة t بدلة المقاومة R_{20}

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha_{20}(t - 20)] \quad (2\text{-}5)$$

حيث α_{20} هي المعامل الحراري لمقاومة المعدن عند ٢٠°م وقيمه معطاة في الجدول ٢-١ .

ب - مقاومة التيار المتردد، تختلف مقاومة التيار المتردد عن مقاومة التيار الثابت لنفس المادة. يرجع ذلك إلى سببين أساسيين هما:

i - الظاهرة القشرية Skin effect حيث يميل التيار إلى المرور داخل الموصل في الطبقة الخارجية منه تاركاً وسط الموصل وذلك بسبب الفيض المغناطيسي للتيار داخل الموصل نفسه.

ii - الظاهرة التجاورية Proximity effect وتنشأ هذه الظاهرة عند وجود كابلين متجاورين يقع كل منهما في المجال المغناطيسي للآخر.

تسبب الظاهرتان السابقتان زيادة في مقاومة التيار المتردد عن مقاومة التيار الثابت. يعطي الجدول ٥-١ المقاومة للمعادن المختلفة بالأم لكل كيلومتر عند ٢٠°م، كما يعطي الجدول ٥-٢ معاملات التصحيح لدرجة الحرارة الفعلية والمحسوبة من المعادلتين (٥-٣) و(٥-٤):

للموصل النحاسي:

$$R_{20} = R_t \frac{254.5}{234.5 + t} \frac{1000}{l} \text{ (Ohm/km)} \quad (3\text{-}5)$$

للموصل الألومنيوم

$$R_{20} = R_t \frac{248}{228 + t} \frac{1000}{l} \text{ (Ohm/km)} \quad (4\text{-}5)$$

حيث l طول الكابل بالمتر و R_{20} و R_t المقاومة بالأوم لكل كيلومتر.

جدول ٥ـ١ مقاومة المعادن عند ٢٠°م

حجم الموصل مم٢	أقصى مقاومة تيار ثابت		
	نحاس صافي (أوم/كم)	نحاس مطلي بالمعدن (أوم/كم)	الومنيوم (أوم/كم)
٠,٥	٣٦,٠	٣٦,٧	
٠,٧٥	٢٤,٥	٢٤,٨	
١	١٨,١	١٨,٢	
١,٥	١٢,١	١٢,٢	
٢,٥	٧,٤١	٧,٥٦	
٤	٤,٦١	٤,٧٠	٧,٤١
٦	٣,٠٨	٣,١١	٤,٦١
١٠	١,٨٣	١,٨٤	٣,٠٨
١٦	١,١٥	١,١٦	١,٩١
١٥	٠,٧٢٧	٠,٧٣٤	١,٢٠
٣٥	٠,٥٢٤	٠,٥٢٩	٠,٨٦٨
٥٠	٠,٣٨٧	٠,٣٩١	٠,٦٤١
٧٠	٠,٢٦٨	٠,٢٧٠	٠,٤٤٣
٩٥	٠,١٩٣	٠,١٩٥	٠,٣٢٠
١٢٠	٠,١٥٣	٠,١٥٤	٠,٢٥٣
١٥٠	٠,١٢٤	٠,١٢٦	٠,٢٠٦
١٨٥	٠,٠٩٩١	٠,١٠٠	٠,١٦٤
٢٤٠	٠,٠٧٥٤	٠,٠٧٦٢	٠,١٢٥
٣٠٠	٠,٠٦٠١	٠,٠٦٠٧	٠,١٠٠
٤٠٠	٠,٠٤٧٠	٠,٠٤٧٥	٠,٠٧٧٨

حجم الموصل مم٢	أقصى مقاومة تيار ثابت نحاس صافي (أوم/كم)	نحاس مطلي بالمعدن (أوم/كم)	الومنيوم (أوم/كم)
٥٠٠	٠,٠٣٦٦	٠,٠٣٦٩	٠,٠٦٠٥
٦٣٠	٠,٠٢٨٣	٠,٠٢٨٦	٠,٠٤٦٩
٨٠٠	٠,٠٢٢١	٠,٠٢٢٤	٠,٠٣٦٧
١٠٠٠	٠,٠١٧٦	٠,٠١٧٧	٠,٠٢٩١
١٢٠٠	٠,٠١٥١	٠,٠١٥١	٠,٠٢٤٧
١٤٠٠	٠,٠١٢٩	٠,٠١٢٩	٠,٠٢١٢
١٦٠٠	٠,٠١١٣	٠,٠١١٣	٠,٠١٨٦
١٨٠٠	٠,٠١٠١	٠,٠١٠١	٠,٠١٦٥
٢٠٠٠	٠,٠٠٩٠	٠,٠٠٩٠	٠,٠١٤٩

تبعاً للمواصفتين (IEC 228) و (BS 6791)

ملحوظة: يمكن الحصول على قيمة تقريبية لمقاومة التيار المتردد بضرب هذه القيمة في ١,١

جدول ٥-٢ معاملات تصحيح المقاومة لدرجات الحرا

درجة حرارة الموصل °م	المعامل للتحويل إلى ٢٠°م	المقلوب للتحويل من ٢٠°م
٥	١,٠٦٤	٠,٩٤٠
٦	١,٠٥٩	٠,٩٤٤
٧	١,٠٥٥	٠,٩٤٨
٨	١,٠٥٠	٠,٩٥٢
٩	١,٠٤٦	٠,٩٥٦
١٠	١,٠٤٢	٠,٩٦٠
١١	١,٠٣٧	٠,٩٦٤
١٢	١,٠٣٣	٠,٩٦٨
١٣	١,٠٢٩	٠,٩٧٢
١٤	١,٠٢٥	٠,٩٧٦
١٥	١,٠٢٠	٠,٩٨٠
١٦	١,٠١٦	٠,٩٨٤
١٧	١,٠١٢	٠,٩٨٨
١٨	١,٠٠٨	٠,٩٩٢
١٩	١,٠٠٤	٠,٩٩٦
٢٠	١,٠٠٠	١,٠٠٠
٢١	٠,٩٩٦	١,٠٠٤
٢٢	٠,٩٩٢	١,٠٠٨
٢٣	٠,٩٨٨	١,٠١٢
٢٤	٠,٩٨٤	١,٠١٦

تابع - جدول ٥-٢

درجة حرارة الموصل °م	المعامل للتحويل إلى ٢٠°م	المقلوب للتحويل من ٢٠°م
٢٥	٠,٩٨٠	١,٠٢٠
٢٦	٠,٩٧٧	١,٠٢٤
٢٧	٠,٩٧٣	١,٠٢٨
٢٨	٠,٩٦٩	١,٠٣٢
٢٩	٠,٩٦٥	١,٠٣٦
٣٠	٠,٩٦٢	١,٠٤٠
٣٥	٠,٩٤٣	١,٠٦٠
٤٠	٠,٩٢٦	١,٠٨٠
٤٥	٠,٩٠٩	١,١٠٠
٥٠	٠,٨٩٣	١,١٢٠
٥٥	٠,٨٧٧	١,١٤٠
٦٠	٠,٨٦٢	١,١٦٠
٦٥	٠,٨٤٧	١,١٨٠
٧٠	٠,٨٣٣	١,٢٠٠
٧٥	٠,٨٢٠	١,٢٢٠
٨٠	٠,٨٠٦	١,٢٤٠
٨٥	٠,٧٩٤	١,٢٦٠
٩٠	٠,٧٨١	١,٢٨٠

٢ . سعة الكابل Cable capacitance

السعة بين أي سطحين موصلين هي النسبة بين الشحنة الواقعة على أحد السطحين q وفرق الجهد بينهما V . يبين الشكل ٥ـ١ مقطعاً من كابل أحادي القلب. نصف قطر الموصل r وجهده V، ونصف قطر الغلاف R وجهده صفر. تعمل شحنة q على متر طولي من الكابل فيضاً كهربياً كثافته D على بعد x من مركزه حيث



شكل ٥ ـ ١ مقطع في كابل وحيد القلب

$$D = \frac{q}{2\pi x} \quad \text{Coulomb/m}^2 \qquad (5\text{-}5)$$

شدة المجال الكهربي E على بعد x تعطى بالعلاقة :

$$E = \frac{D}{\epsilon} = \frac{q}{2\pi \epsilon x} \quad \text{volts/m.} \qquad (6\text{-}5)$$

ويمكن الحصول على فرق الجهد بين الموصل والكابل من العلاقة

$$V = \int_{x=R}^{x=r} -E\,dx$$

$$\therefore V = \int_{R}^{r} -\frac{q}{2\pi \epsilon x}\,dx$$

$$= \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{R}{r} \quad \text{Volts} \qquad (7\text{-}5)$$

وبذلك تكون السعة C هي :

$$C = \frac{q}{V} = \frac{2\pi \epsilon}{\ln \frac{R}{r}} \quad \text{Farad/m} \qquad (8\text{-}5)$$

وبوضع

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \frac{\epsilon_r}{36\pi} 10^{-9}$$

ينتج

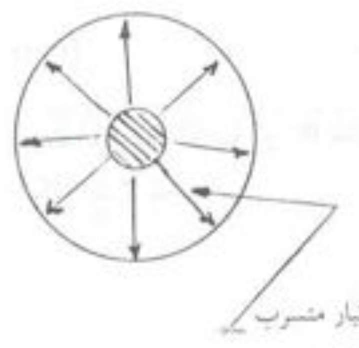
$$C = \frac{\epsilon_r}{18 \times 10^9 \times \ln \frac{R}{r}} \quad F/m \qquad (9\text{-}5)$$

$$C = \frac{0.024\, \epsilon_r}{\log_{10} \frac{R}{r}} \quad \mu F/km \qquad (10\text{-}5)$$

تتأثر السماحية النسبية قليلاً بدرجة الحرارة، إلا أنه يمكن إهمال هذا التأثير في ظروف التشغيل العادية.

٢ . مقاومة العازل Insulation resistance

نظراً لعدم وجود مادة ذات عزل كامل $(R = \infty)$ فإنه بمجرد تعريض الكابل للجهد عند طرف الإرسال يتولد فرق جهد بين قلب الكابل وغلافه حتى وإن كان الكابل غير محمل أي لا يمر تيار في موصل الكابل. يمر تيار متسرب في اتجاه شعاعي Radial من الموصل إلى الغلاف كما هو مبين بالشكل ٥ـ٢ . هذا



شكل ٥ ـ ٢ اتجاه التيار داخل العازل

التيار يعتبر تياراً متسرباً خلال مقاومة العازل. لحساب تلك المقاومة نعود إلى شكل ٥ـ١ ونعتبر قشرة اسطوانية من وحدة أطوال الكابل نصف قطرها x وسمكها dx. يمر تيار التسرب عمودياً على مساحة سطح الاسطوانة $(2\pi x.1)$ لمسافة dx في اتجاه سريانه ومقاومة هذا المسار هي dR_i حيث

$$dR_i = \frac{\rho dx}{2\pi x} \quad Ohm/m.$$

حيث ρ مقاومية مادة العازل بالأوم . متر. بإجراء التكامل للحصول على المقاومة الكلية للعازل R_i

$$R_i = \frac{\rho}{2\pi} \int_r^R \frac{dx}{x}$$

$$= \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \quad Ohm/m. \qquad (11\text{-}5)$$

٤ . زاوية فقد العازل δ Dielectric loss angle

عند التأثير بجهد U_0 بين الموصل والسطح الخارجي للعازل يمر تيار I من الموصل إلى الغلاف من خلال هذا العازل. هذا التيار له مركبتان، I_c نتيجة للسعة بين الموصل والغلاف و I_R نتيجة لمقاومة العازل كما هو موضح بالشكل ٥-٣

$$I_C = \omega C U_0 \quad (12\text{-}5)$$

$$I_R = \frac{U_0}{R_i} \quad (13\text{-}5)$$

شكل ٥ - ٣ التيار المار في الكابل

حيث C سعة الكابل و R_i مقاومة العازل. من شكل ٥-٣ نجد أن:

$$\text{Cot}\ \phi = \frac{U_0}{R_i} \cdot \frac{1}{\omega C U_0} = \frac{1}{\omega C R_i}$$

معامل قدرة الكابل يعطى من العلاقة

$$\cos\phi = \frac{I_R}{I} = \frac{(U_0/R_i)}{I}$$

نظراً لأن القيم الفعلية للزاوية ϕ قريبة جداً من $\frac{\pi}{2}$ فإن

$$\cos\phi \cong \cot\phi$$
$$\cong \delta \cong \left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)$$
$$\cong \frac{1}{\omega C R_i}$$

والفقد P_d في عازل الكابل هو U_0^2/R_i أي أن

$$P_d = U_0^2\, \omega C \tan\delta$$
$$= U_0^2\, \omega C \delta \quad (14\text{-}5)$$

تعرف الزاوية δ بزاوية فقد العازل (DLA). ويجب أن تكون أصغر ما يمكن حتى يمكن تقليل الفقد في العازل الذي يسبب بدوره ارتفاعاً في درجة حرارة الكابل مما يؤدي إلى الحد من قدرة تحميله.

تتأثر زاوية فقد العازل بشدة في الكابلات ذات العازل الورقي حيث تكون حساسة لمحتوى الماء في الورق بحيث تقل كلما كان الورق أكثر جفافاً. كما أن المادة الراتنجية المضافة لزيت التشبيع تجعل δ تزيد بسرعة مع زيادة درجة الحرارة (راجع شكل ٢-٤)، ولذلك لا يُفضل استعمال تلك المادة في كابلات الجهد العالي.

٥. شدة المجال الكهربي Electric stress

يُعطى شدة المجال الكهربي E على بعد x من مركز الكابل بالعلاقة

$$E = \frac{q}{2\pi \epsilon x} \quad V/m.$$

ويعطى الجهد U_0 بين الموصل والغلاف بالعلاقة

$$U_0 = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R}{r} \quad V$$

أي أن العلاقة بين E و U_0 هي:

$$E = \frac{U_0}{x \ln \frac{R}{r}} \quad V/m \qquad (15\text{-}5)$$

وأقصى مجال كهربي عند x = r أي عند سطح الموصل

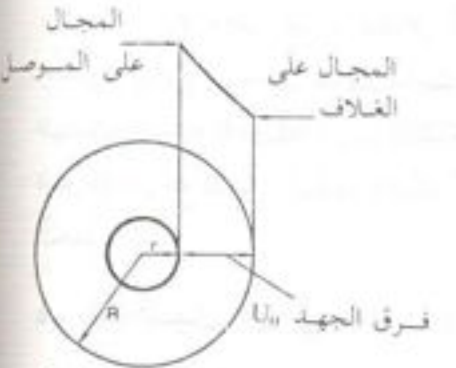
$$E_{max} = \frac{U_0}{r \ln \frac{R}{r}} \quad V/m \qquad (16\text{-}5)$$

وأقل مجال كهربي عند x = R أي عند سطح الغلاف الداخلي

$$E_{min} = \frac{U_0}{R \ln \frac{R}{r}} \qquad (17\text{-}5)$$

وتكون النسبة بين E_{max} و E_{min} هي :

$$\frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{R}{r} \qquad (18\text{-}5)$$



شكل ٥ ـ ٤ المجال الكهربي في كابل أحادي القلب

أي أن شدة المجال الكهربي غير منتظمة داخل عازل الكابل بحيث تكون أكبر ما يمكن على السطح الملامس للموصل وأقل ما يمكن على السطح الملامس للغلاف كما هو مبين بالشكل ٥ـ٤ .

تتسبب عملية جدل الأسلاك للحصول على موصل الكابل في زيادة شدة المجال الكهربي على سطح الموصل بنسبة تصل إلى ٢٠٪، ولذلك فإنه من الخبرة المعمول بها في صناعة كابلات الجهد العالي أن يُلف الموصل المجدول بشريط معدني أو شبه موصل رقيق للحصول على سطح أملس للموصل بغرض تقليل شدة المجال الكهربي على سطحه. يمكن الحصول على نصف قطر الموصل الذي يجعل E_{max} أقل ما يمكن عند قيمة معينة V من جهد التشغيل وذلك كما يأتي :

نفرض أن نصف قطر الموصل r (قيمة متغيرة) وأن كلاً من نصف قطر الغلاف R وجهد الكابل V ثابتان. عندما تكون E_r أقل ما يمكن فإن

$$\frac{dE_r}{dr} = 0$$

أي أن

$$\frac{d}{dr}\left[\frac{V}{r \ln (R/r)}\right] = 0$$

ومنها ينتج

$$\frac{R}{r} = e = 2.718$$

أي أن نصف قطر الموصل الذي يعطي أقل جهد كهربي عند سطحه يساوي R/2.718 وعندها يكون

$$E_{max} = \frac{V}{r} \quad (19\text{-}5)$$

تجدر الإشارة هنا إلى أن مساحة موصل الكابل تتحدد أساساً بقيمة التيار المطلوب مروره في هذا الموصل. ويحدث في كثير من الأحيان أن تكون مساحة الموصل اللازمة تبعاً للتيار المار أقل من تلك التي يحدث عندها أقل جهد كهربي على سطح العازل الملامس للموصل. يلزم في تلك الحال زيادة سمك العازل للحفاظ على قيمة أقصى جهد. إن زيادة مساحة مقطع الموصل هو حل آخر للمشكلة، ويتم تطبيقه في بعض الحالات كما في حالة الكابلات المملوءة بالزيت ذات العازل الورقي المستعملة في النقل على جهود أكبر من ٦٦ ك ف.

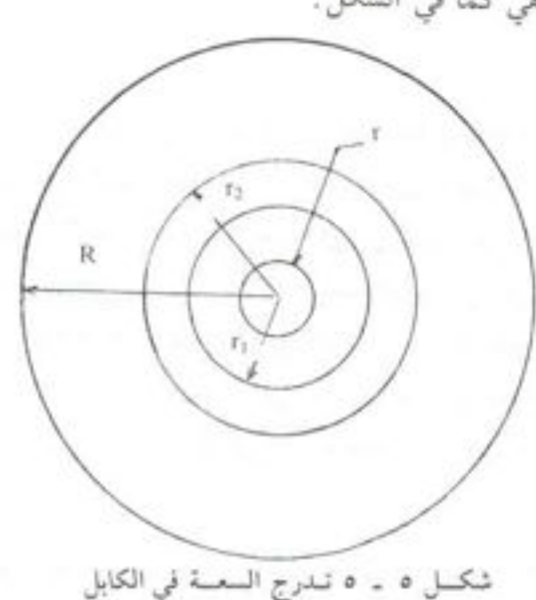
إن ظاهرة عدم إنتظام شدة المجال الكهربي داخل العازل تعني أن هذا العازل لم يستغل بالطريقة السليمة. يمكن تحسين كفاءة إستغلال العازل عن طريق استعمال أكثر من طبقة من العازل بحيث تكون الطبقة الملامسة للموصل هي الأعلى في شدة مقاومة الانهيار الكهربي، وتقل تلك الشدة في الطبقات الخارجية. تسمى هذه الطريقة بطريقة تدرج السعة Capacitance grading وتطبق عادة في الكابلات ذات العوازل الورقية كما تم الإشارة إليه سابقاً في الباب الثاني.

تدرج السعة

تدل المعادلة (٥-٦) على أنه إذا كانت الكمية (ε.x) ثابتة فإن شدة المجال الكهربي تظل ثابتة خلال العازل، بمعنى أن سماحية العازل تتناسب عكسياً مع البعد من مركز الكابل، إلا أن هذا النوع من العوازل لا يمكن تحقيقه فيزيائياً.

لعل أقرب تفكير لتحقيق أحسن النتائج هو استعمال عدة عوازل متتالية بحيث تقل سماحية كل عازل كلما اقترب من الغلاف وبذلك يمكن أن نجعل

قيم أقصى إجهاد كهربي متساوية في جميع العوازل. بالإشارة إلى الشكل ٥ـ٥ نفرض أن السماحية النسبية للعوازل هي ϵ_1 و ϵ_2 و ϵ_3 لثلاثة عوازل مختلفة وأنصاف الأقطار هي كما في الشكل.



شكل ٥ ـ ٥ تدرج السعة في الكابل

$$\left.\begin{aligned} E_1 &= \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_1 x} \\ E_2 &= \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_2 x} \\ E_3 &= \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_3 x} \end{aligned}\right] \quad (20\text{-}5)$$

جهد الكابل الكلي هو V حيث

$$V = \int_{r}^{r_1} \frac{q.dx}{2\pi\epsilon_0\epsilon_1 x} + \int_{r_1}^{r_2} \frac{q.dx}{2\pi\epsilon_0\epsilon_2 x} + \int_{r_2}^{R} \frac{q.dx}{2\pi\epsilon_0\epsilon_3 x}$$

$$= \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_3} \ln \frac{R}{r_2}\right] \quad (21\text{-}5)$$

$$C = \frac{q}{V} = 2\pi\epsilon_0 \left[\frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_3} \ln \frac{R}{r_2}}\right] \quad (22\text{-}5)$$

ومنها ينتج أن

$$q = \frac{2\pi\epsilon_0 V}{\left[\frac{1}{\epsilon_1}\ln\frac{r_1}{r} + \frac{1}{\epsilon_2}\ln\frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_3}\ln\frac{R}{r_2}\right]} \quad \text{.........} (23\text{-}5)$$

وعلى هذا فإن مقدار أقصى إجهاد كهربي في كل عازل هو

$$E_{1max} = \frac{V}{r\left[\ln\frac{r_1}{r} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\ln\frac{r_2}{r_1} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_3}\ln\frac{R}{r_2}\right]} \quad \text{.........} (24\text{-}5)$$

$$E_{2max} = \frac{V}{r_1\left[\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\ln\frac{r_1}{r} + \ln\frac{r_2}{r_1} + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_3}\ln\frac{R}{r_2}\right]} \quad \text{.........} (25\text{-}5)$$

$$E_{3max} = \frac{V}{r_2\left[\frac{\epsilon_3}{\epsilon_1}\ln\frac{r_1}{r} + \frac{\epsilon_3}{\epsilon_2}\ln\frac{r_2}{r_1} + \ln\frac{R}{r_3}\right]} \quad \text{.........} (26\text{-}5)$$

وإذا جعلنا أقصى إجهاد كهربي متساوٍ في الثلاثة عوازل نجد أن

$$\epsilon_1 r = \epsilon_2 r_1 = \epsilon_3 r_2 \quad \text{.........} (27\text{-}5)$$

وبتطبيق المعادلة (16-5) على كل طبقة من العازل ينتج

$$\left.\begin{aligned} E_{1max} &= \frac{V_1}{r\ln(r_1/r)} \\ E_{2max} &= \frac{V_2}{r_1\ln(r_2/r_1)} \\ E_{3max} &= \frac{V_3}{r_2\ln(R/r_2)} \end{aligned}\right] \quad \text{.........} (28\text{-}5)$$

حيث V_1 و V_2 و V_3 هي الجهود خلال الطبقات الثلاث. وإذا كان

$$E_{1max} = E_{2max} = E_{3max}$$

فإن الجهد الكلي عبر الكابل بين الموصل والغلاف يصبح

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = E_{1max}\left(r \ln\frac{r_1}{r} + r_1 \ln\frac{r_2}{r_1} + r_2 \ln\frac{R}{r_2}\right) \qquad (29\text{-}5)$$

تبين المعادلة (5-29) إمكانية زيادة جهد التشغيل لنفس الشدة الكهربية المسموح بها، وذلك على فرض تساوي شدة العزل الكهربي للطبقات الثلاث. في حالة عدم تساوي الشدة الكهربية فإن العلاقة الآتية يلزم تحقيقها لجعل أقصى إجهاد كهربي لكل عازل يتناسب مع شدته الكهربية.

$$\alpha_1\epsilon_1 r = \alpha_2\epsilon_2 r_1 = \alpha_3\epsilon_3 r_2 \qquad (30\text{-}5)$$

حيث α_1 و α_2 و α_3 هي شدة العزل الكهربي للعوازل ذات السماحية ϵ_1 و ϵ_2 و ϵ_3 على الترتيب. يبين الشكل ٥ـ٦ تغير الإجهاد الكهربي داخل العوازل باستعمال طريقة تدرج السعة. الخط المقطع هو الإجهاد الكهربي في حال استعمال عازل واحد بسماحية ϵ_3.

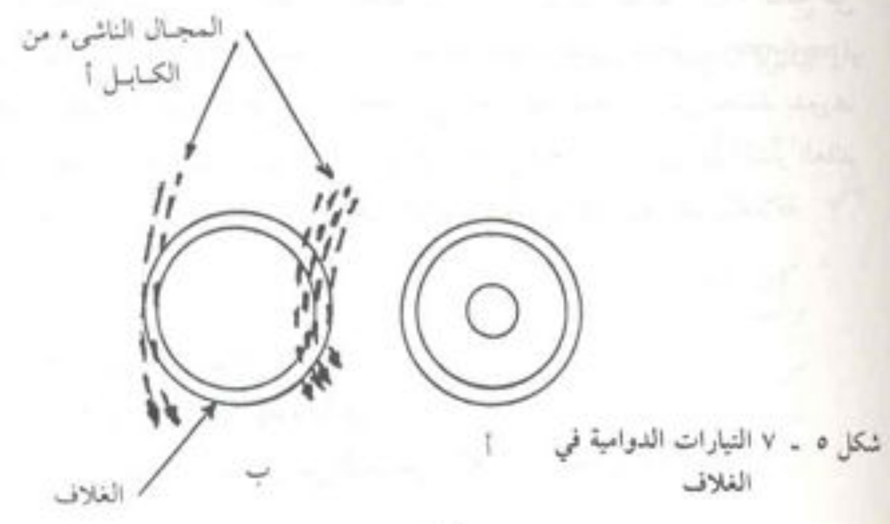
٦ . تأثيرات الغلاف Sheath effects

عند مرور تيار في موصل الكابل ذي القلب الواحد فإن هذا التيار يولد حوله مجالاً مغناطيسياً عبارة عن مسارات مقفلة من الفيض المغناطيسي تولد قوة دافعة كهربية بالتأثير في غلاف الكابل نفسه وكذلك في أغلفة الكابلات المجاورة له. هذه القوة الدافعة الكهربية تسبب تيارات تأثيرية ينتج عنها مفقودات في غلاف الكابل. يمكن أن يتولدنوعان من مفقودات الغلاف كما يأتي:

أ ـ مفقودات التيارات الدوامية في الغلاف:

تتولد التيارات الدوامية في غلاف الكابل نتيجة لوجوده بجوار كابل آخر. بالإشارة إلى شكل ٥ـ٧، عند مرور تيار في موصل الكابل أ يتولد مجال مغناطيسي يقطع غلاف الكابل ب المجاور له بحيث يكون هذا المجال في المقطع من غلاف الكابل ب القريب من الكابل أ أشد من المقطع البعيد عنه. يتولد عن ذلك فرق في الجهد بين مقطعي الغلاف ينشأ عنه تيارات دوامية. ينشأ

شكل ٥ ـ ٦ تغيير شدة المجال الكهربي باستعمال تدرج السعة



شكل ٥ ـ ٧ التيارات الدوامية في الغلاف

عن تلك التيارات مفقودات التيارات الدوامية في الغلاف والتي تعطى بالعلاقة الآتية لثلاثة كابلات متجاورة.

$$S_c = I^2 \left[\frac{3\omega^2}{R_S} \left(\frac{d_m}{2S} \right) 10^{-8} \right] \text{Watt/km/phase} \qquad (30\text{-}5)$$

حيث

S_c: مفقودات التيارات الدوامية في الغلاف

I: التيار (أمبير)

ω: $2\pi f$

d_m: متوسط قطر الغلاف (متر)

S: المسافة بين مركزي الكابلين (متر)

R_S: مقاومة الغلاف (أوم / كم).

إن هـذا النوع من المفقـودات صغير جـداً بالنسبـة لمفقودات الموصل (حوالي ٢٪) ويمكن إهماله عادة إلا في حالة الكابلات ذات الأغلفة الألومنيوم عندما توضع هذه الكابلات قريبة من بعضها.

ب ـ مفقودات دائرة الغلاف:

عند توصيل غلاف الكابل بالأرض أو بغلاف كابل آخر في أكثر من نقطة يتولد محيط مغلق Closed loop يحيط بمساحة يخترقها الفيض Flux الناتج من تيار الموصل. يؤدي هذا بدوره إلى تولد قوة دافعة بتأثير المحول Transformer action يعتمد مقدارها على المساحة التي يخترقها الفيض والتي تعتمد بدورها على المسافة بين الكابلات أو بين غلاف الكابل والمسار المتوسط للتيار العائد في الأرض أو أي وسط آخر. يعطي الجهد التأثيري في الغلاف بالعلاقة

$$E_N = IX_M \qquad (31\text{-}5)$$

حيث I = تيار الموصل

$X_M = 2\pi f M 10^{-3}$ (أوم / كم)

M = الحث التبادلي بين الموصل والغلاف ويعطي بالعلاقة

$$M = 0.2 \log_e \frac{2S}{d_m} \quad (mH/km) \qquad (32\text{-}5)$$

تعطى معاوقة الغلاف Z_S بالعلاقة

$$Z_S = \sqrt{R_S^2 + X_M^2} \qquad (33\text{-}5)$$

وعلى ذلك فإن تيار الغلاف هو

$$I_S = \frac{E_S}{\sqrt{R_S^2 + X_M^2}} \quad (A) \qquad (34\text{-}5)$$

$$I_S = \frac{I X_M}{\sqrt{R_S^2 + X_M^2}} \qquad (35\text{-}5)$$

وتصبح مفقودات تيار الغلاف لكل طور هي :

$$I_S^2 R_S = \frac{I^2 X_M^2 R_S}{R_S^2 + X_M^2} \quad (Watt/km) \qquad (36\text{-}5)$$

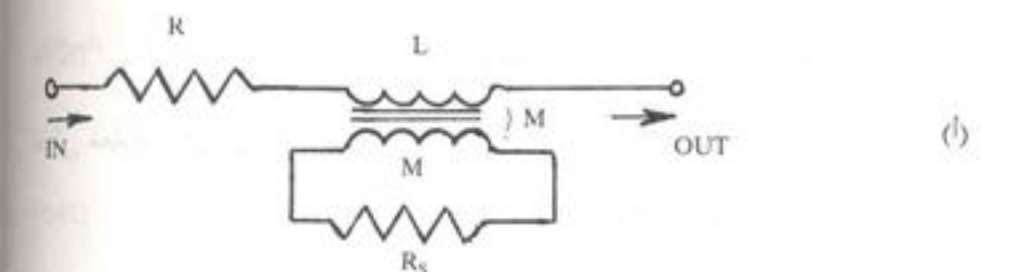
ينتج من التحليل السابق أن مقدار الفقد الكلي في الغلاف الناتج من التيارات الدوامية ودائرة الغلاف هو:

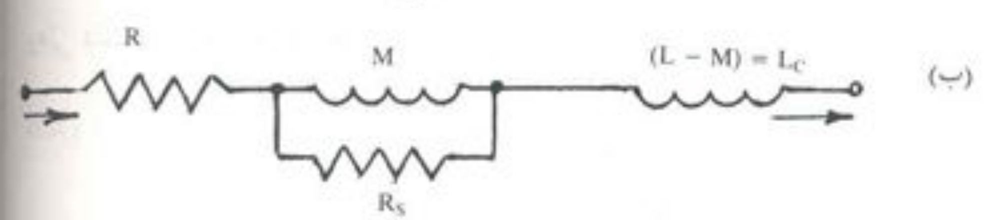
$$I^2 R_S \left\{ \frac{X_M^2}{R_S^2 + X_M^2} + \left[\frac{3\omega^2}{R_S^2} \left(\frac{d_m}{2S} \right)^2 10^{-8} \right] \right\} (W/km/ph.) \qquad (37\text{-}5)$$

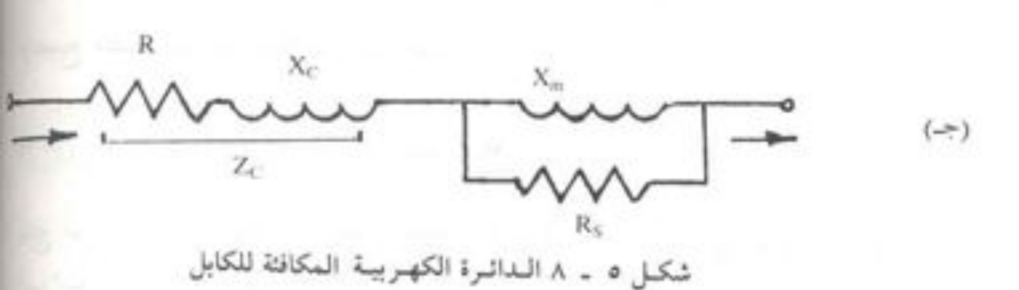
٧ . الدائرة الكهربية المكافئة للكابل

يبين الشكل ٥ـ٨ خطوات استنباط الدائرة الكهربية المكافئة للكابل كما يأتي :

أ - في الشكل ٥ـ٨ (أ) تظهر دائرة الموصل المكونة من مقاومة الموصل R والمحاثة الذاتية له L Self inductance ثم دائرة الغلاف المقفلة المكونة من مقاومة الغلاف R_s ومحاثته الذاتية M . ويوجد بين الموصل والغلاف حث تبادلي بمعامل حث تبادلي Mutual inducatnce يساوي المحاثة الذاتية للغلاف M تقريباً .







شكـل ٥ ـ ٨ الـدائـرة الكهـربيـة المكافئة للكابل

ii ـ أمكن تمثيل الدائـرة (أ) بواسـطة الدائـرة (ب) حيث الكمية (L-M) هي الحث Leakage inducatnce L_C بين الموصل والغلاف.

iii ـ يبين الشكل (حـ) تحويل هذه المحاثات إلى مفاعلات Reactances.

المعاوقة الكلية لدائرة الكابل (القلب مع الغلاف) هي:

$$Z = R + jX_C + \frac{jX_m R_S}{R_S + jX_m}$$

$$= R + jX_C + \frac{X_m R_S (X_m + jR_S)}{R_S^2 + X_m^2}$$

$$= R + \frac{X_m^2 R_S}{R_S^2 + X_m^2} + j\left(X_C + \frac{X_m R_S^2}{R_S^2 + X_m^2}\right) \qquad (38\text{-}5)$$

يتضح من المعادلة (5-38) أن تأثير وجود الغلاف أدى إلى :

i - زيادة مقاومة موصل الكابل بمقدار

$$\frac{X_m^2 R_S}{R_S^2 + X_m^2} \qquad (39\text{-}5)$$

ii - أصبحت المفاعلة المؤثرة للكابل هي :

$$X_C + \frac{X_m R_S^2}{R_S^2 + X_m^2} \qquad (40\text{-}5)$$

بدلاً من مفاعلة الموصل الأصلية X حيث

$$X = \omega L \qquad (41\text{-}5)$$

من المعادلتين (5-40) و (5-41) نجد أن مفاعلة الكابل قد نقصت بمقدار

$$X - \left[X_C + \frac{X_m R_S^2}{R_S^2 + X_m^2}\right]$$

$$= X - \left[(X - X_m) + \frac{X_m R_S^2}{R_S^2 + X_m^2}\right]$$

$$= \frac{X_m^3}{R_S^2 + X_m^2} \qquad (42\text{-}5)$$

لإمكان تجنب تيارات الغلاف العالية والمفقودات المترتبة عليها مما ينتج عنه خفض في قدرة حمل التيار بالنسبة للكابل، تُربط أغلفة الثلاثة كابلات ذات القلب الواحد الحاملة لتيارات الأطوال الثلاثة ربطاً متقاطعاً Cross bonded، بمعنى أن يوصل غلاف الكابل الأول بغلاف الكابل الثاني ثم بعد ذلك بغلاف الكابل الثالث. إن هذا يمنع تيارات الغلاف نظراً لأن جهود الأغلفة الثلاثة مُزاحة عن بعضها بزاوية ١٢٠° وجهد الغلاف يحصر في كل جزء. إن هذا التوضيح مبني على فرض أن الكابلات الثلاثة موضوعة في شكل مثلث متساوي الأضلاع Trefoil. أما إذا وضعت الكابلات على مستوى أفقي في خط مستقيم فإن مفقودات الكابل لن تكون متساوية في الكابلات الثلاثة وستنشأ كمية من الفقد تنتقل من كابل إلى آخر.

إن العملية التبادلية Transposition بين الكابلات، وهي العملية المعتادة في خطوط النقل الهوائية تجعل دوائر الغلاف متساوية إلا أنه يظل هناك كمية من الفقد الكلي أكبر بكثير من تلك الناشئة في حالة وضع الكابلات الثلاثة على شكل مثلثي متساوي الأضلاع. ومن هنا تظهر ميزة استخدام هذا الشكل في عملية تركيب الكابلات حيث يجب إتباعه كلما كان ذلك ممكناً.

٨ . **المعاوقات التتابعية Sequence Impedances**:

تظهر أهمية الحاجة إلى معرفة قيم المعاوقات التتابعية في فترات التشغيل غير المتماثل الناشيء عادة من حدوث قصر، حيث تستخدم العلاقات الآتية لحساب تيارات القصر:

أ ـ في حالة قصر بين خط وأرض:

$$I_f = \frac{U}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (A) \qquad (43\text{-}5)$$

ب ـ في حالة قصر بين خطين

$$I_f = \frac{U}{Z_1 + Z_2} \quad (A) \qquad (44\text{-}5)$$

حيث:

U: الجهد الطوري بالفولت.

I_f: تيار الخطأ بالأمبير.

Z_1: معاوقة التتابع الموجب بالأوم Positive phase sequence impedance

Z_2: معاوقة التتابع السالب بالأوم Negative phase sequence impedance

Z_0: معاوقة التتابع الصفري بالأوم Zero phase sequence impedance.

إن المعتاد في حالات التعامل مع الكابلات هو طلب قيم تلك المعاوقات من المصانع المنتجة لتلك الكابلات حيث يتم تحديدها عادة بطرق معملية وقياسات لنتائج بعض التجارب عليها. وبصفة عامة يمكن أخذ ما يأتي في الاعتبار.

أ ـ المعاوقة السالبة (معاوقة التتابع السالب) تساوي دائماً المعاوقة الموجبة (معاوقة التتابع الموجب).

ب ـ المقاومة الصفرية (مقاومة التتابع الصفري) تساوي مقاومة الموصل للتيار المتردد مضافاً إليه التأثير القشري ولا يضاف إليه التأثير التجاوري، ثم يضاف إليه بعد ذلك المقاومة المكافئة للغلاف المعدني في الكابل (جميع الطبقات المعدنية الموجودة في الكابل). يمكن حساب قيمة مقاومة الغلاف المعدني كما هو موضح بالهامش د.

حـ ـ تحسب المفاعلة للتابع الصفري من العلاقة

$$X_0 = 2\pi f 10^{-3}\left(0.2 \ln \frac{D}{d} + K\right) \quad \text{Ohm/Km} \qquad (46\text{-}5)$$

حيث:

X_0: مفاعلة التتابع الصفري

f: التردد

D: القطر المتوسط للغلاف المعدني (مم)

d: قطر الموصل (مم)

k: ثابت يعتمد على تكوين الموصل ومبين في الجدول ٥ـ٣.

جدول ٥ـ٣ قيم الثابت K في المعادلتين (٥ـ٤٦) و(٥ـ٥٦)

عدد أسلاك الموصل	K
٣	٠,٠٧٧٨
٧	٠,٠٦٤٢
١٩	٠,٠٥٥٤
٣٧	٠,٠٥٢٨
٦١ وأكثر	٠,٠٥١٤

ثانياً: الكابل ثلاثي القلوب

١ . مقاومة الموصل

لا تتغير قيمة مقاومة الموصل في الكابلات ثلاثية القلب عن قيمتها في الكابلات وحيدة القلب من نفس نوع ومساحة مقطع الموصل وطوله.

٢ . سعة الكابل

ندرس في هذا المجال سعة الكابل ثلاثي القلوب ذي الشريط. أما الكابلات الأخرى من الأنواع H و SL و SA و HSL فهي مكافئة تماماً لثلاثة كابلات أحادية القلب من حيث اعتبار السعة وشدة المجال الكهربي.

لا توجد طريقة سهلة لحساب سعة الكابل ذي الشريط ثلاثي القلوب، وتعين السعة عادة عن طريق القياس. تجدر الأشارة هنا إلى وجود علاقة تجريبية يمكن بواسطتها حساب سعة الكابل الكلية C_0 بين الغلاف وكل قلب على حدة. تبين المعادلة (47-5) هذه العلاقة

$$C_0 = \frac{0.0299\epsilon}{\log_{10}\left[1 + \frac{T+t}{d}\left(3.84 - 1.70\frac{t}{T} + 0.52\frac{t^2}{T^2}\right)\right]} \ \mu F/km \quad (47\text{-}5)$$

حيث:

ϵ: السماحية النسبية للعازل

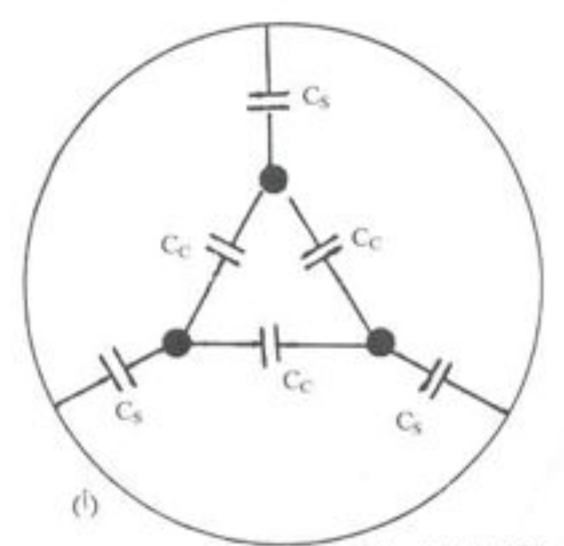
d: قطر الموصل (مم)

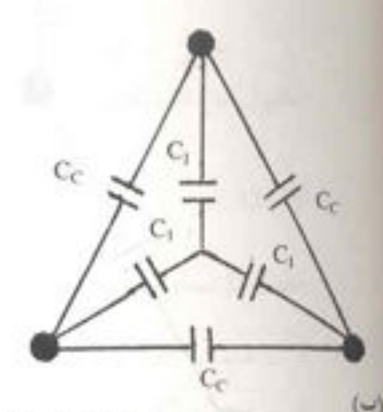
T: سمك عازل الموصل (مم)

t: سمك الشريط العازل (مم)

طريقة القياس

يبين الشكل ٥ـ٩(أ) السعات الموجودة في الكابل. توجد سعة C_S بين كل قلب وبين غلاف الكابل. بالإضافة إلى ذلك، توجد سعة C_C بين كل قلب من قلوب الكابل والقلبين الآخرين.





شكل ٥ ـ ٩ السعات في الكابل ثلاثي القلوب ذي الشريط

بتحويل شكل الدلتا المكون من الثلاث سعات المتساوية C_C إلى شكل نجمة Star نجد أن $C_1 = 3C_C$ كما هو مبين بالشكل ٥ـ٩ (ب)، وتصبح بذلك السعة الكلية بين الموصل والغلاف هي C_0 حيث

$$C_0 = C_S + 3\,C_C \qquad (48\text{-}5)$$

يمكن بذلك معرفة قيمة C_0 بتحديد قيمة كل من C_S و C_C كما يأتي:

أ ـ نصل أي قلبين بغلاف الكابل ثم نقس السعة بين القلب الثالث والغلاف، ولتكن C_x. الشكل ٥ـ١٠ يوضح ذلك، ونجد أن

$$C_x = 2\,C_C + C_S \qquad (49\text{-}5)$$

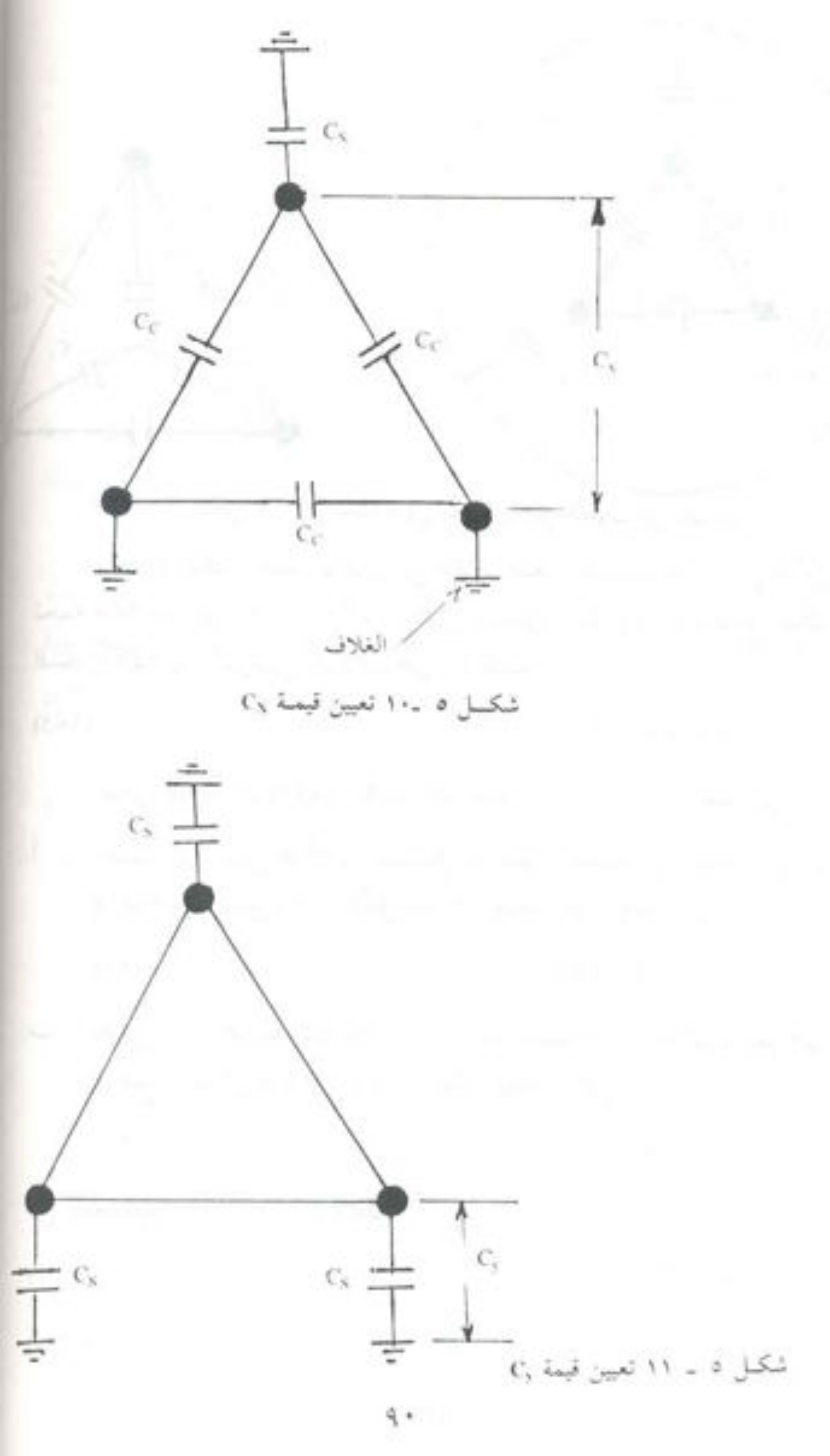
ب ـ نصل الثلاثة قلوب ببعضها ونقيس السعة بينهما وبين الغلاف، كما هو موضح بالشكل ٥ـ١١، نجد أن تلك السعة C_y هي:

$$C_y = 3C_S \qquad (50\text{-}5)$$

من المعادلتين (5-49) و (5-50) نجد أن:

$$C_S = \frac{1}{3}C_y \qquad (51\text{-}5)$$

$$C_C = \frac{1}{2}C_x - \frac{1}{6}C_y \qquad (52\text{-}5)$$



شكـل ٥ ـ ١٠ تعيين قيمة C_x

شكـل ٥ ـ ١١ تعيين قيمة C_s

$$C_0 = C_s + 3C_c = \frac{3}{2}C_x - \frac{1}{6}C_y \qquad (53\text{-}5)$$

يمكن ـ علاوة على ما سبق ـ الحصول على قيمتي C_x، C_y بتقريب مقبول من العلاقات الآتية:

$$C_x = \frac{\epsilon}{18 \log_e (D/d)} \quad (\mu F/km) \qquad (54\text{-}5)$$

حيث D تساوي قطر موصل واحد مضافاً إليه ما يأتي:

i ـ سمك العازل بين موصلين.

ii ـ سمك العازل بين أي موصل والغلاف.

$$C_y = 1.8\ C_x \qquad (54\text{-}5)$$

$$C_o = 1.2\ C_x \qquad (55.5)$$

٢ . المعاوقات التتابعية

تتساوى مفاعلة التتابع الموجب ومفاعلة التتابع السالب في الكابلات ثلاثية القلوب، ويمكن حسابهما من المعادلة

$$X_1 = X_2 = 2\pi f 10^{-3}\left(K + 0.2 \ln \frac{2S}{d}\right) (Ohm/km) \qquad (56\text{-}5)$$

حيث:

S: المسافة بين مركزي موصلين في الكابل

d: قطر الموصل

k: ثابت يعتمد على تكوين الموصل ومبين في الجدول ٥-٣.

وتُحسب مفاعلة التتابع الصفري من المعادلة.

$$X_0 = 0.434 \log_{10} (D/GMD) \quad (Ohm/km) \qquad (57\text{-}5)$$

حيث GMD هو متوسط القطر الهندسي للموصلات داخل الكابل ويمكن الحصول عليه من الهامش هـ.

تؤخذ قيمة GMD عادة ٠,٧٥ من قطر الدائرة المحيط بالموصلات

الثلاثة داخل الكابل على فرض أن الموصلات دائرية (في حالة عدم توفر المعلومات).

أما قيمة المقاومة للتتابع الصفري فهي مقاومة التيار المتردد مضافاً إليها:

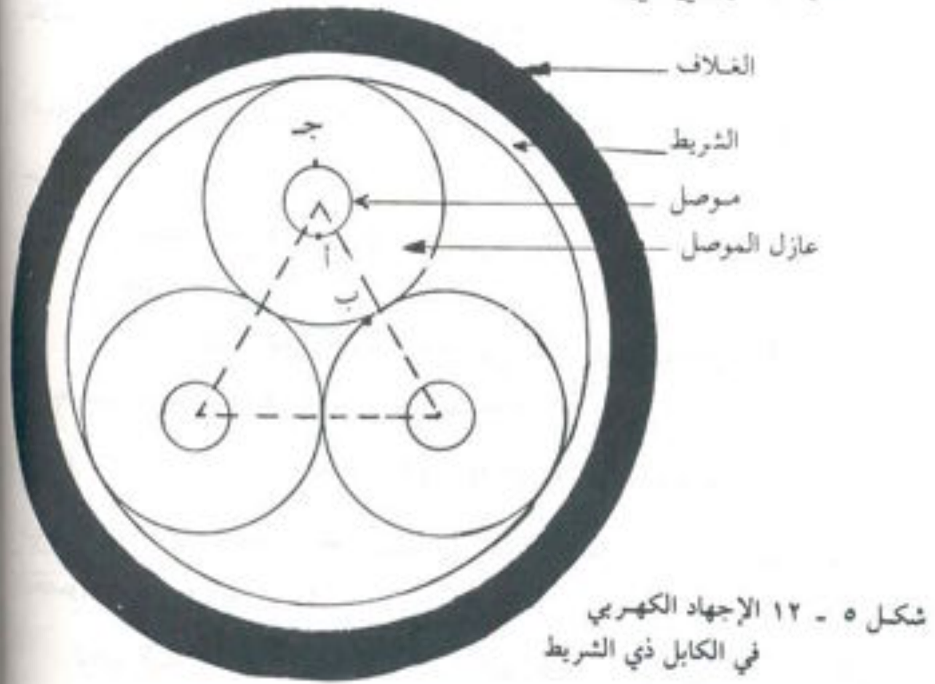
i - التأثير القشري

ii - ثلاثة أضعاف مقاومة الغلاف المعدني.

وعند وجود أكثر من طبقة معدنية تعتبر هذه الطبقات على التوازي عند حساب مقاومة الغلاف المعدني. ويمكن القول بصفة عامة أن جميع مسارات التيار الأرضي في جميع الأجسام المعدنية الموجودة بالكابل (ما عدا الموصل) تُعتبر على التوازي ثم نوجد ثلاثة أمثالها لإيجاد المقاومة لكل طور وذلك بالنسبة للتتابع الصفري فقط.

يمكن حساب تلك المقاومات من أبعاد الكابل ومقاومية تلك المواد بعد تحديد اتجاه مسار التيار في كل منها.

٤ ـ المجال الكهربي في الكابلات ذات الشريط



شكل ٥ ـ ١٢ الإجهاد الكهربي في الكابل ذي الشريط

لا يمكن في الكابلات ثلاثية القلب ذات الشريط أن نحسب المجال الكهربي بدقة حتى على فرض أن العازل متجانس. أمكن إيجاد خواص المجال الكهربي معملياً، ويمكن تلخيص النتائج فيما يأتي:

أ - المجال داخل الكابل له الطبيعة ثلاثية الأطوار. يدور المجال بسرعة زاوية منتظمة كما في حالة الآلات ثلاثية الأطوار.

ب - يعتمد شدة المجال الكهربي على أبعاد الكابل وعلى جهد الكابل نفسه.

حـ - تتشابه المجالات الكهربية في الكابلات المتشابهة في التكوين والشكل الهندسي إلا أن مقاديرها تعتمد على القيم العددية للأبعاد والجهد.

د - يحدث أقصى قيمة للإجهاد الكهربي في المنطقة المثلثية المكونة من الخطوط الواصلة بين مراكز الموصلات الثلاثة الموضحة بخطوط متقطعة في الشكل ٥-١٢. ولا تعتمد قيمةالاجهادالكهربي على سمك الشريط.

هـ - أقصى قيمة للإجهاد الكهربي داخل الكابل تحدث على العازل عند اتصاله بالموصل داخل المنطقة المثلثة (نقطة أ).

و - يتغير اتجاه المجال الكهربي بحيث يحدث في لحظات معينة أن توجد مركبة مماسة للمجال الكهربي عند نقطة معينة مثل ب في الوقت الذي يكون المجال عمودياً عند أ مثلاً. وهذه المركبة المماسة هي المسئولة فعلياً عن ضعف العازل وانهيار خواصه الكهربية. وكما ذكرنا من قبل فإن وجود الستارة في الكابلات من النوع H يعالج هذه الظاهرة.

ز - تعتمد قيمة الإجهاد الكهربي عند نقطة مثل جـ على السطح الفاصل بين الموصل والعازل من ناحية الغلاف اعتماداً كبيراً على سمك الشريط العازل بحيث أنه كلما زاد سمك العازل كلما قلت قيمه هذا الإجهاد.

يبين الشكل ٥-١٣ شكل المجال الكهربي داخل الكابل عندما يكون الموصل العلوي عند أقصى قيمة للجهد المتردد.

إختيار الكابل

يخضع اختيار الكابل المناسب لاعتبارات عديدة، منها ما يتصل بالوفاء بمتطلبات محددة كملائمة الكابل لظروف البيئة المحيطة به، ومنها ما يتصل بعملية أداء وتشغيل الكابل نفسه كقدرة الكابل على حمل التيار وكذلك قدرته على تحمل تيارات القصر. ندرس فيما يلي أهم العوامل التي يتحدد تبعاً لها اختيار الكابل.

أولاً: تكوين الكابل ونوعه

يتم اختيار نوع الكابل من بين مجموعة كبيرة من الاختيارات، حيث يمكن استخدام كابل ذي ثلاثة قلوب أو أربعة قلوب، كما يمكن استخدام كابلات ذات قلب واحد في الدوائر ثلاثية الأطوار. يجب مراعاة مواد وتركيب الكابل من حيث نوع العازل والموصل والغلاف والتسليح والحماية الخارجية وملائمة ذلك كله لظروف البيئة والتشغيل. هذا بالأضافة إلى أية اشتراطات خاصة إضافية كمقاومة الزيوت والحرارة واللهب والمواد الكيماوية.

إن اختيار الكابل يخضع للمفاضلة بين تلك العوامل كلها مجتمعة مع الأخذ في الاعتبار العامل الاقتصادي وتوافر الخبرة اللازمة للتعامل مع الكابل. نقدم فيما يلي تفصيلاً لذلك في الاستخدامات المختلفة للكابلات.

i - كابلات شبكة الامداد العامة Cables for public supply:

تعمل شبكة الإمداد العامة على جهود تتراوح بين ١١ ك ف و ٣٣ ك ف. كما يُستعمل جهد ٦٦ ك ف أحياناً في تلك الشبكات.

تستعمـل كابـلات العازل الـورقي وكابـلات XLPE و EPR عـادة على جهدي ٢٢ ك ف و ٣٣ ك ف. وتخضع عملية الاختيار للعامل الاقتصـادي في أغلب الأحيان. إلا أنه يجب التنويه إلى أن عمليات لحام وتوصيل نهايات كابل العـوازل الورقيـة تحتاج إلى مهـارة وخبرة ودقـة في الأداء أعلى من تلك المطلوبة في كابلات XLPE وكابلات EPR. لذلك فإن كثيراً من الـدول التي تندر عندها الخبرة باستعمال الكابلات الورقية تفضل استعمال كابلات العوازل البوليمرية بسبب البساطة النسبية في التعامل معها كما أن تأثرها بالرطوبة أقل. هذا بالإضافة إلى أن كابلات العوازل البوليمرية تتحمل درجات حرارة أعلى من كابلات العوازل الورقية مما يجعلها أنسب استعمالاً في البلدان الحارة.

يجب عند استخدام الكابلات ذات العـوازل الورقيـة في شبكة الامـداد العامة أن تكون من النوع ذي الستارة ومزودة بغلاف رصاصي وتسليح خارجي. أما عند استخدام كابلات XLPE فلا توجد ضرورة كبيرة لتسليح الكابل إلا عند توقع تعرضه لإجهادات ميكانيكية عنيفة. ويُزود الكابل عادة بستارة من أسلاك النحاس كمادة تأريض Earthing محيطة به.

يستعمل كلاً من كابلات العـازل الورقي وكـابلات XLPE على جهـدي ١١ ك ف و١٥ ك ف، إلا أنه أصبح من المتفق عليه عالمياً استخدام كابلات XLPE في شبكات التوزيع الأولية حيث يستخدم كابلات ثلاثية الأطوار عادة.

ii . كابلات المنشآت الصناعية العامة

تستعمل كابلات PVC للمنشآت الصناعية حتى جهد ٣,٣ ك ف بنجاح تام. تستخدم بعض المنشـآت الصناعيـة كابـلات PVC على جهد ١١ ك ف وأكبر من ذلك حتى ١٥ ك ف عادة. إلا أن الاتجاه السائد حتى الآن هو عدم استخـدام كـابـلات PVC لجهـود أعلى من ٣,٣ ك ف نـظراً لارتفـاع قيمـة السماحية ومعامل القدرة له. تُستخدم كابلات العازل الورقي وكذلك كابـلات XLPE لجهـود ١١ ك ف وأعلى من ذلك وكـذلك يستخـدم عـازل EPR في بعض الأحيان.

iii . كابلات المصانع الكيماوية وصناعات البتروكيماويات

نظراً لتعرض تلك الكابلات للمواد الكيماوية كالزيوت والأحماض والغازات والمواد العضوية فإنه يجب عمل الحماية اللازمة للكابل. يتم ذلك إما باستعمال كابلات ذات غلاف أو كابلات عليها طبقة الحماية الخارجية المناسبة أو الطريقتين معاً. تجدر الإشارة هنا إلى أن بعض المواد العضوية لها القدرة على اختراق طبقة الحماية الخارجية للكابل والوصول إلى قلب الكابل مما يزيد من احتمال حدوث الحريق. كما يراعى منع احتمال تسرب الزيوت والمواد الأخرى القابلة للاشتعال ووصولها إلى الكابل.

iv . كابلات السفن

تُستعمل كابلات ذات موصلات نحاسية، ولا تُستعمل موصلات الألومنيوم نظراً لتعرضها للتآكل السريع على السفن. يُستعمل الآن عازل EPR بدلاً من مطاط البتيل نظراً لخواصه الفيزيائية الأفضل وتحمله لدرجات حرارة أعلى. لا يُفضل استخدام كابلات PVC لعدم قدرتها على تحمل درجات حرارة أعلى من ٦٠°م على السفينة كما لا يفضل استخدام عوازل XLPE نظراً لقساوة تلك المادة مما يصعِّب عملية ثني وتداول الكابل في مسارات السفن الضيقة.

تُستعمل المواد المقاومة للحرارة والزيت والمبطئة للهب (HOFR) كغلاف أو كحماية خارجية لكابلات السفن مثل مادة PCP ومادة CSP.

ثانياً: قدرة حمل التيار Current carrying capacity

يسبب مرور التيار في موصل الكابل وكذلك وجود فرق جهد بين الموصل والأرض مجموعة من المفقودات تعمل على رفع درجة حرارة الموصل والعازل وباقي مكونات الكابل. تتحدد قدرة حمل التيار لكابل معين بأقصى درجة حرارة يمكن أن يتحملها الكابل بصفة مستمرة. عند تلك الدرجة يحدث اتزان حراري حيث يتساوى معدل توليد الطاقة المفقودة مع معدل تسرب هذه الطاقة من

الكابل عن طريق اتصاله بالوسط الخارجي المحيط به. يتأثر مقدار الارتفاع في درجة حرارة موصل الكابل ـ وبالتالي درجة الاتزان الحراري ـ بالعوامل الآتية:

١ ـ تيار الموصل I
٢ ـ مقاومة الموصل R
٣ ـ الفقد في العازل W_d: وهو يساوي $(\omega C U_0^2 \tan\delta)$ وات/متر
٤ ـ المقاومة الحرارية بين الموصل والغلاف T_1: تعرَّف المقاومية الحرارية Thermal resistivity بأنها الفرق في درجة الحرارة بالكلفن، بين سطحين متوازيين من متر مكعب من المادة عندما يمر بينهما قدرة مقدارها وات واحد من الحرارة ووحدتها هي كلفن متر لكل وات (Km/W).
٥ ـ المقاومة الحرارية للبطانة بين الغلاف والتسليح T_2 (Km/W)
٦ ـ المقاومة الحرارية للغلاف الخارجي T_3 (Km/W)
٧ ـ المقاومة الحرارية بين سطح الكابل والوسط المحيط به T_4 (Km/W).
٨ - عدد الموصلات الحاملة للتيار في الكابل n
٩ ـ النسبة بين الفقد في الغلاف المعدني والفقد في موصل الكابل λ_1
١٠ ـ النسبة بين الفقد في التسليح والفقد في موصل الكابل λ_2.

تعطى المعادلة الآتية مقدار الارتفاع في درجة حرارة الموصل $\Delta\theta$ بالكلفن:

$$\Delta\theta = (I^2R + \frac{1}{2}W_d)\ T_1 + [I^2R\ (1 + \lambda_1) + W_d]nT_2$$

$$+ [I^2R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d]\ n\ (T_3 + T_4). \qquad (1\text{-}6)$$

يعطي الجدول ٦ـ١ قيم المقاومية الحرارية للمواد المستعملة في صناعة الكابلات وذلك تبعاً للمواصفة (IEC-287). ويعطي الجدول ٦ـ٢ القيم النمطية للمقاومية الحرارية للأنواع المختلفة من التربة.

جدول ٦-١ المقاومية الحرارية للمواد

المـــــــــادة	المقاومية الحرارية (Km/W)
العوازل	
الورق	٥,٥ - ٦,٥
PE و XLPE	٣,٥
PVC حتى جهد ٣ ك ف	٥,٠
أعلى من ٣ ك ف	٦,٠
EPR حتى ٣ ك ف	٣,٥
أعلى من ٣ ك ف	٥,٠
مطاط البتيل والمطاط الطبيعي	٥,٠
الحماية الخارجية	
الجوت والمواد الليفية	٦,٠٠
PCP	٥,٥
PVC حتى جهد ٣٥ ك ف	٥,٠٠
أعلى من ٣٥ ك ف	٦,٠٠
PE	٣,٥
مواد المجاري ducts	
الأسمنت المسلح	١
الفبر	٤,٨
PVC	٧,٠

جدول ٦-٢ المقاومية الحرارية للتربة

المقاومية الحرارية (Km/W)	حالة التربة	حالة الطقس
٠,٧	رطبة جداً	رطب دائماً
١,٠	رطبة	أمطار منتظمة
٢,٠	جافة	أمطار نادرة
٣,٠	جافة جداً	لا توجد أمطار عادة

إن حساب قيمة الارتفاع في درجة حرارة الموصل عملية شاقة ولا يتم اللجوء إليها عادة إلا في مصانع الكابلات نفسها.

تعطى مصانع الكابلات عادة جداول بها قدرة حمل التيار للكابلات المختلفة عند ظروف تشغيل قياسية. ونظراً لاختلاف ظروف التشغيل الواقعية عن الظروف القياسية فإن هذه الجداول تُزوَّد بملاحق خاصة لتصحيح قيمة قدرة حمل التيار تبعاً لكل ظرف عن طريق ضرب تلك القيمة المناظرة للحالة القياسية في معامل التقنين Rating factor المناظر للحالة الواقعية. رغم أن لكل مصنع كابلات جداوله وملاحقه الخاصة به إلا أننا نعطي فيما يلي صوراً نمطية لتلك الجداول والملاحق يمكن بواسطتها الحصول على قدرة حمل التيار بصورة طيبة ودقيقة إلى حد ما وذلك في حالة عدم توافر الجداول الخاصة بالكابل المعني.

i - الكابلات الموضوعة في الهواء:

الظروف القياسية هي كما يأتي:

أ - درجة حرارة الهواء المحيط ٢٥°م لكابلات التوزيع والنقل و٣٠°م للكابلات داخل المباني و٣٥°م للكابلات على السفن.

ب - أقل مسافة بين الكابل والحائط هي ٢٠مم

حـ - المسافة بينن الكابل وأقرب كابل آخر مجاور له لا تقـل عن ١٥٠سم، ويتم التبديل في مواضع الكابلات لمنع فقد التبادل الحراري.

د - الكابل معزول عن ضوء الشمس المباشر.

يعطى الجدول ٦-٣ معـاملات التقنين للتصحيـح من ٢٥°م إلى درجات الحرارة الأخرى وذلك لأنواع الكابلات المختلفة.

جدول ٦-٣ معاملات التقنين لدرجة حرارة الوسط

عازل الكابل	أقصى درجة حرارة تشغيل للموصل °م	درجة حرارة الهواء المحيط °م						
		٢٥	٣٠	٣٥	٤٠	٤٥	٥٠	٥٥
ورق	٦٥	١	٠,٩٣	٠,٨٥	٠,٧٧	٠,٦٨	٠,٥٨	٠,٤٧
ورق	٧٠	١	٠,٩٣	٠,٨٧	٠,٨٠	٠,٧٣	٠,٦٤	٠,٥٥
ورق	٨٠	١	٠,٩٤	٠,٨٩	٠,٨٤	٠,٧٧	٠,٧٢	٠,٦٥
PVC	٧٠	١	٠,٩٣	٠,٨٧	٠,٨٠	٠,٧٣	٠,٦٤	٠,٥٥
XLPE	٩٠	١	٠,٩٥	٠,٩١	٠,٨٦	٠,٨٠	٠,٧٥	٠,٦٩

ii - الكابلات المدفونة مباشرة في الأرض:

الظروف القياسية كما يأتي:

أ - درجة حرارة الأرض ١٥°م

ب - المقاومية الحرارية للتربة ١,٢ كلفن. متر/وات

حـ - الكابل المجاور ١,٨م على الأقل

د - عمق الدفن ٠,٥ متر لكابلات ١ ك ف

٠,٨ متر لأعلى من ١ ك ف

تعطى الجداول من ٦-٤ إلى ٦-٨ معاملات التقنين لكل من درجة حرارة الأرض والمقاومية الحرارية للتربة وتجميع الكابلات وعمق الدفن.

جدول ٦ـ٤ معاملات التقنين لدرجة حرارة الأرض

عازل الكابل	أقصى درجة حرارة تشغيل للموصل °م	درجة حرارة الأرض °م							
		١٠	١٥	٢٠	٢٥	٣٠	٣٥	٤٠	٤٥
ورق	٦٥	١,٠٥	١,٠	٠,٩٥	٠,٨٩	٠,٨٤	٠,٧٧	٠,٧١	٠,٦٣
ورق	٧٠	١,٠٤	١,٠	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠	٠,٧٤	٠,٦٧
ورق	٧٥	١,٠٤	١,٠	٠,٩٦	٠,٩٢	٠,٨٨	٠,٨٣	٠,٧٨	٠,٧٣
PVC	٧٠	١,٠٤	١,٠	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠	٠,٧٤	٠,٦٧
XLPE	٩٠	١,٠٣	١,٠	٠,٩٧	٠,٩٣	٠,٨٩	٠,٨٥	٠,٨١	٠,٧٧

جدول ٦ـ٥ معاملات التقنين للمقاومية الحرارية للتربة

حجم الموصل (مم²)	المقاومية الحرارية للتربة (Km/W)						
	٠,٨	٠,٩	١,٠	١,٥	٢,٠	٢,٥	٣,٠
كابل ذو قلب واحد							
حتى ١٥٠	١,١٦	١,١١	١,٠٧	٠,٩١	٠,٨١	٠,٧٣	٠,٦٧
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,١٧	١,١٢	١,٠٧	٠,٩٠	٠,٨٠	٠,٧٢	٠,٦٦
من ٥٠٠ إلى ١٢٠٠	١,١٨	١,١٣	١,٠٨	٠,٩٠	٠,٧٩	٠,٧١	٠,٦٥
كابل عديد القلوب							
حتى ١٦	١,٠٩	١,٠٦	١,٠٤	٠,٩٥	٠,٨٦	٠,٧٩	٠,٧٤
من ٢٥ إلى ١٥٠	١,١٤	١,١٠	١,٠٧	٠,٩٣	٠,٨٤	٠,٧٦	٠,٧٠
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,١٦	١,١١	١,٠٧	٠,٩٢	٠,٨٢	٠,٧٤	٠,٦٨

جدول ٦-٦ معاملات التقنين التجميعية لثلاثة كابلات أحادية القلب متجاورة

جهد الكابل ك ف	عدد الكابلات المتجاورة	المسافة بين مركزي كابلين متجاورين					
		تلامس					
		مثلثي	مسطح	٠,١٥م	٠,٣م	٠,٤٥م	٠,٦م
	٢	٠,٧٧	٠,٨٠	٠,٨٢	٠,٨٨	٠,٩٠	٠,٩٣
	٣	٠,٦٥	٠,٦٨	٠,٧٢	٠,٧٩	٠,٨٣	٠,٨٧
١/٠,٦	٤	٠,٥٩	٠,٦٣	٠,٦٧	٠,٧٥	٠,٨١	٠,٨٥
	٥	٠,٥٥	٠,٥٨	٠,٦٣	٠,٧٢	٠,٧٨	٠,٨٣
	٦	٠,٦٢	٠,٥٦	٠,٦٠	٠,٧٠	٠,٧٧	٠,٨٢
أعلى	٢	٠,٧٨	٠,٨٠	٠,٨١	٠,٨٥	٠,٨٨	٠,٩٠
من	٣	٠,٦٦	٠,٦٩	٠,٧١	٠,٧٦	٠,٨٠	٠,٨٣
٣,٣/١,٩	٤	٠,٦٠	٠,٦٣	٠,٦٥	٠,٧٢	٠,٧٦	٠,٨٠
حتى	٥	٠,٥٥	٠,٥٨	٠,٦١	٠,٦٨	٠,٧٣	٠,٧٧
٢٢/١٢,٧	٦	٠,٥٢	٠,٥٥	٠,٥٨	٠,٦٦	٠,٧٢	٠,٧٦
٣٣/١٩	٢	٠,٧٩	٠,٨١	٠,٨١	٠,٨٥	٠,٨٨	٠,٩٠
	٣	٠,٦٧	٠,٧٠	٠,٧١	٠,٧٦	٠,٨٠	٠,٨٣
	٤	٠,٦٢	٠,٦٥	٠,٦٥	٠,٧٢	٠,٧٦	٠,٨٠
	٥	٠,٥٧	٠,٦٠	٠,٦٠	٠,٦٨	٠,٧٣	٠,٧٧
	٦	٠,٥٤	٠,٥٧	٠,٥٧	٠,٦٦	٠,٧٢	٠,٧٦

جدول ٦-٧ معاملات التقنين التجميعية للكابلات عديدة القلوب في وضع مسطح

جهد الكابل ك ف	عدد الكابلات في المجموعة	المسافة بين مراكز الكابلات				
		تلامس	٠,١٥م	٠,٣م	٠,٤٥م	٠,٦م
١/٠,٦	٢	٠,٨١	٠,٨٧	٠,٩١	٠,٩٣	٠,٩٤
	٣	٠,٧٠	٠,٧٨	٠,٨٤	٠,٨٧	٠,٩٠
	٤	٠,٦٣	٠,٧٤	٠,٨١	٠,٨٦	٠,٨٩
	٥	٠,٥٩	٠,٧٠	٠,٧٨	٠,٨٣	٠,٨٧
	٦	٠,٥٥	٠,٦٧	٠,٧٦	٠,٨٢	٠,٨٦
أعلى من ٣,٣/١,٩ حتى ٢٢/١٢,٧	٢	٠,٨٠	٠,٨٥	٠,٨٩	٠,٩٠	٠,٩٢
	٣	٠,٦٩	٠,٧٥	٠,٨٠	٠,٨٤	٠,٨٦
	٤	٠,٦٣	٠,٧٠	٠,٧٧	٠,٨٠	٠,٨٤
	٥	٠,٥٧	٠,٦٦	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨١
	٦	٠,٥٥	٠,٦٣	٠,٧١	٠,٧٦	٠,٨٠
٣٣/١٩	٢	٠,٨٠	٠,٨٣	٠,٨٧	٠,٨٩	٠,٩١
	٣	٠,٧٠	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨٢	٠,٨٥
	٤	٠,٦٤	٠,٦٨	٠,٧٤	٠,٧٨	٠,٨٢
	٥	٠,٥٩	٠,٦٣	٠,٧٠	٠,٧٥	٠,٧٩
	٦	٠,٥٦	٠,٦٠	٠,٦٨	٠,٧٤	٠,٧٨

جدول ٦-٨ معاملات تقنين عمق الدفن (حتى مركز الكابل أو مركز المجموعة الثلاثية)

عمق الدفن (متر)	١/٠,٦ ك ف			٣,٣/١,٩ ك ف حتى ٣٣/١٩ ك ف	
	حتى ٥٠مم^{٢}	من ٧٠ إلى ٣٠٠ مم^{٢}	أعلى من ٣٠٠مم^{٢}	حتى ٣٠٠مم^{٢}	أعلى من ٣٠٠مم^{٢}
٠,٥٠	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	—	—
٠,٦٠	٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٩٧	—	—
٠,٨٠	٠,٩٧	٠,٩٦	٠,٩٤	١,٠٠	١,٠٠
١,٠٠	٠,٩٥	٠,٩٤	٠,٩٢	٠,٩٨	٠,٩٧
١,٢٥	٠,٩٤	٠,٩٢	٠,٩٠	٠,٩٦	٠,٩٥
١,٥٠	٠,٩٣	٠,٩١	٠,٨٩	٠,٩٥	٠,٩٤
١,٧٥	٠,٩٢	٠,٨٩	٠,٨٧	٠,٩٤	٠,٩٢
٢,٠٠	٠,٩١	٠,٨٨	٠,٨٦	٠,٩٢	٠,٩٠
٢,٥	٠,٩٠	٠,٨٧	٠,٨٥	٠,٩١	٠,٨٩
٣ أو أكثر	٠,٨٩	٠,٨٦	٠,٨٣	٠,٩٠	٠,٨٨

iii . الكابلات الموضوعة داخل مجاري:

الظروف القياسية هي كما يأتي :

أ - درجة حرارة الأرض ١٥°م

ب - المقاومية الحرارية للتربة والمجاري ١,٢ كلفن متر/وات

حـ - الكابل المجاور ١,٨ متر على الأقل

د - عمق الدفن ٠,٥ متر لكابلات ١ ك ف

٠,٨ متر للكابلات ذات العازل الورقي وللجهود أعلى من ١ ك ف

معاملات التقنين لدرجة حرارة الأرض هي نفسها كما في حالة الدفن المباشر المعطاة بالجدول ٦ـ٤ . بقية معاملات التقنين معطاة في الجداول من ٦ـ٩ إلى ٦ـ١٢ .

جدول ٦ـ٩ معاملات التقنين للمقاومية الحرارية للتربة

حجم الموصل (مم^٢)	المقاومية الحرارية للتربة (Km/W)						
	٠,٨	٠,٩	١	١,٥	٢	٢,٥	٣,٠
كابل ذو قلب واحد							
حتى ١٥٠	١,١	١,٠٧	١,٠٤	٠,٩٤	٠,٨٧	٠,٨١	٠,٧٥
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,١١	١,٠٨	١,٠٥	٠,٩٤	٠,٨٦	٠,٧٩	٠,٧٣
من ٥٠٠ إلى ١٢٠٠	١,١٣	١,٠٩	١,٠٦	٠,٩٣	٠,٨٤	٠,٧٧	٠,٧٠
كابل عديد القلوب							
حتى ١٦	١,٠٥	١,٠٤	١,٠٣	٠,٩٧	٠,٩٢	٠,٨٧	٠,٨٣
من ٢٥ إلى ١٥٠	١,٠٧	١,٠٥	١,٠٣	٠,٩٦	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٧٨
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,٠٩	١,٠٦	١,٠٤	٠,٩٥	٠,٨٧	٠,٨٢	٠,٧٦

جدول ٦-١٠ معاملات التقنين التجميعية لكابلات أحادية القلب مثلثية الوضع، في مجاري في وضع مسطح

جهد الكابل ك ف	عدد الدوائر المتجاورة	المسافة بين مراكز المجاري تلامس	٠,٤٥ م	٠,٦ م
١/٠,٦	٢	٠,٨٦	٠,٩٠	٠,٩٣
	٣	٠,٧٧	٠,٨٣	٠,٨٧
	٤	٠,٧٣	٠,٨١	٠,٨٥
	٥	٠,٧٠	٠,٧٨	٠,٨٣
	٦	٠,٦٨	٠,٧٧	٠,٨٢
من ٣,٣/١,٩ حتى ٢٢/١٢,٧	٢	٠,٨٥	٠,٨٨	٠,٩٠
	٣	٠,٧٥	٠,٨٠	٠,٨٣
	٤	٠,٧٠	٠,٧٦	٠,٨٠
	٥	٠,٦٧	٠,٧٣	٠,٧٧
	٦	٠,٦٤	٠,٧١	٠,٧٦
٣٣/١٩	٢	٠,٨٥	٠,٨٨	٠,٩٠
	٣	٠,٧٦	٠,٨٠	٠,٨٣
	٤	٠,٧١	٠,٧٦	٠,٨٠
	٥	٠,٦٧	٠,٧٣	٠,٧٧
	٦	٠,٦٥	٠,٧١	٠,٧٦

جدول ٦-١١ معاملات التقنين التجميعية للكابلات عديدة القلوب داخل مجاري في وضع مسطح

جهد الكابل ك ف	عدد المجاري في المجموعة	المسافة بين مركز المجاري تلامس	٠,٣٠م	٠,٤٥م	٠,٦٠م
	٢	٠,٩٠	٠,٩٣	٠,٩٥	٠,٩٦
	٣	٠,٨٢	٠,٨٧	٠,٩٠	٠,٩٣
١/٠,٦	٤	٠,٧٨	٠,٨٥	٠,٨٩	٠,٩١
	٥	٠,٧٥	٠,٨٢	٠,٨٧	٠,٩٠
	٦	٠,٧٢	٠,٨١	٠,٨٦	٠,٩٠
	٢	٠,٨٨	٠,٩١	٠,٩٣	٠,٩٤
٣,٣/١,٩	٣	٠,٨٠	٠,٨٤	٠,٨٧	٠,٨٩
حتى	٤	٠,٧٥	٠,٨١	٠,٨٤	٠,٨٧
٢٢/١٢,٧	٥	٠,٧١	٠,٧٧	٠,٨٢	٠,٨٥
	٦	٠,٦٩	٠,٧٥	٠,٨٠	٠,٨٤
	٢	٠,٨٧	٠,٨٩	٠,٩٢	٠,٩٣
	٣	٠,٧٨	٠,٨٢	٠,٨٥	٠,٨٧
٣٣/١٩	٤	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨٢	٠,٨٥
	٥	٠,٦٩	٠,٧٥	٠,٧٩	٠,٨٣
	٦	٠,٦٧	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨٢

جدول ٦ـ١٢ معاملات تقنين عمق الدفن (حتى مركز المجرى أو المجموعة المثلثية للمجاري)

عمق الدفن	٠,٦/١ ك ف		من ٣,٣/١,٩ حتى ٣٣/١٩ ك ف	
(متر)	قلب واحد	عديد القلوب	قلب واحد	عديد القلوب
٠,٥٠	١,٠٠	١,٠٠	—	—
٠,٦٠	٠,٩٨	٠,٩٩	—	—
٠,٨٠	٠,٩٥	٠,٩٧	١,٠٠	١,٠٠
١,٠٠	٠,٩٣	٠,٩٦	٠,٩٨	٠,٩٩
١,٢٥	٠,٩٠	٠,٩٥	٠,٩٥	٠,٩٧
١,٥٠	٠,٨٩	٠,٩٤	٠,٩٣	٠,٩٦
١,٧٥	٠,٨٨	٠,٩٤	٠,٩٢	٠,٩٥
٢,٠٠	٠,٨٧	٠,٩٣	٠,٩٠	٠,٩٤
٢,٥٠	٠,٨٦	٠,٩٣	٠,٨٩	٠,٩٣
٣,٠ أو أكثر	٠,٨٥	٠,٩٢	٠,٨٨	٠,٩٢

لكي نتصور مدى تـأثير معـاملات التقنين المختلفـة على عملية اختيـار حجم الكابل نعتبر حالة منشأة صناعية إحتاجت إلى كابلات PVC بمقنن جهد ١٠٠٠/٦٠٠ ڤولت وذلك لحمل تيار مقداره ١٠٠٠ أمبير لكل طور. إقتضت ظروف التشغيل استعمال ٤ كابلات ذات قلب واحد بحيث يحمـل كل كـابل ٢٥٠ أمبير وذلك للطور الواحد. كما أن مسار الكابل كان مدفـوناً مبـاشرة في الأرض على أن توضع الكابلات كلها في وضع أفقي مسطح على عمق ١,٢٥ متر من سطح الأرض والمسافة بين كل كابل والذي يجاوره ٣٠ سم. المقاومية الحرارية للتربة ٢ كلفن متر/وات ودرجة حرارتها ٤٠°م.

معاملات التقنين هي كما يأتي:

معامل تقنين درجة حرارة الأرض = ٠,٧٤ (من جدول ٦ـ٣)

معامل تقنين المقاومية الحرارية للتربة = ٠,٨ (من جدول ٦-٤ على أساس أن المقطع سوف يتجاوز ١٥٠مم٢).
معامل تقنين عمق الدفن = ٠,٩ (من جدول ٦-٧)
معامل التقنين التجميعي = ٠,٧٥ (من جدول ٦-٥)

بضرب معاملات التقنين الأربعة في بعضها نحصل على معامل التقنين الكلي للكابل وهو يساوي ٠,٧٤ × ٠,٨ × ٠,٩ × ٠,٧٥ = ٠,٤

معنى ذلك أنه يلزم إيجاد كابل ذي مقطع يتحمل تياراً مقداره (٢٥٠ ÷ ٠,٤) = ٦٢٥ أمبير تحت ظروف التشغيل العادية وهو ما يكافىء تياراً مقداره ٢٥٠ أمبير في الظروف القياسية.

ثالثاً: تيار القصر Short circuit current

يحدث في كثير من الأحيان أن يكون العامل المحدد لاختيار مساحة مقطع الموصل هو قدرة الكابل على حمل تيارات القصر وليست قدرته على حمل التيار في الظروف العادية للتحميل. ينشأ عن تيارات القصر التي يصل مقدارها إلى أكثر من عشرين مرة من تيار الحمل العادي إجهادات ميكانيكية وحرارية تحدد مقدار الفترة الزمنية التي يمكن للكابل أن يتحملها بوجود تيار القصر. إن عازل الكابل هو أكثر المواد تأثراً بتلك الاجهادات، حيث تصل أقصى درجة حرارة مسموح بها إلى ٢٥٠°م في الورق و ١٥٠°م في PVC و ٢٥٠°م في XLPE.

تتغير أقصى فترة زمنية مسموح بها لتيار القصر داخل الكابل تغيراً عكسياً مع تيار القصر تبعاً للعلاقة.

$$I^2 = \frac{K^2S^2}{T} \quad \log_e \quad \frac{\theta_1 + \beta}{\theta_0 + \beta} \qquad (2-6)$$

حيث

I: تيار القصر المتماثل (r.m.s) بالأمبير

T: فترة القصر بالثانية

S: مساحة الموصل (مم^٢)

θ_1: درجة الحرارة النهاية (°م)

θ_0: درجة الحرارة قبل القصر مباشرة (°م)

β ، K : ثابتان يعتمدان على مادة المعادن الموجودة داخل الكابل، ويتعينان من الجدول ٦-١٣.

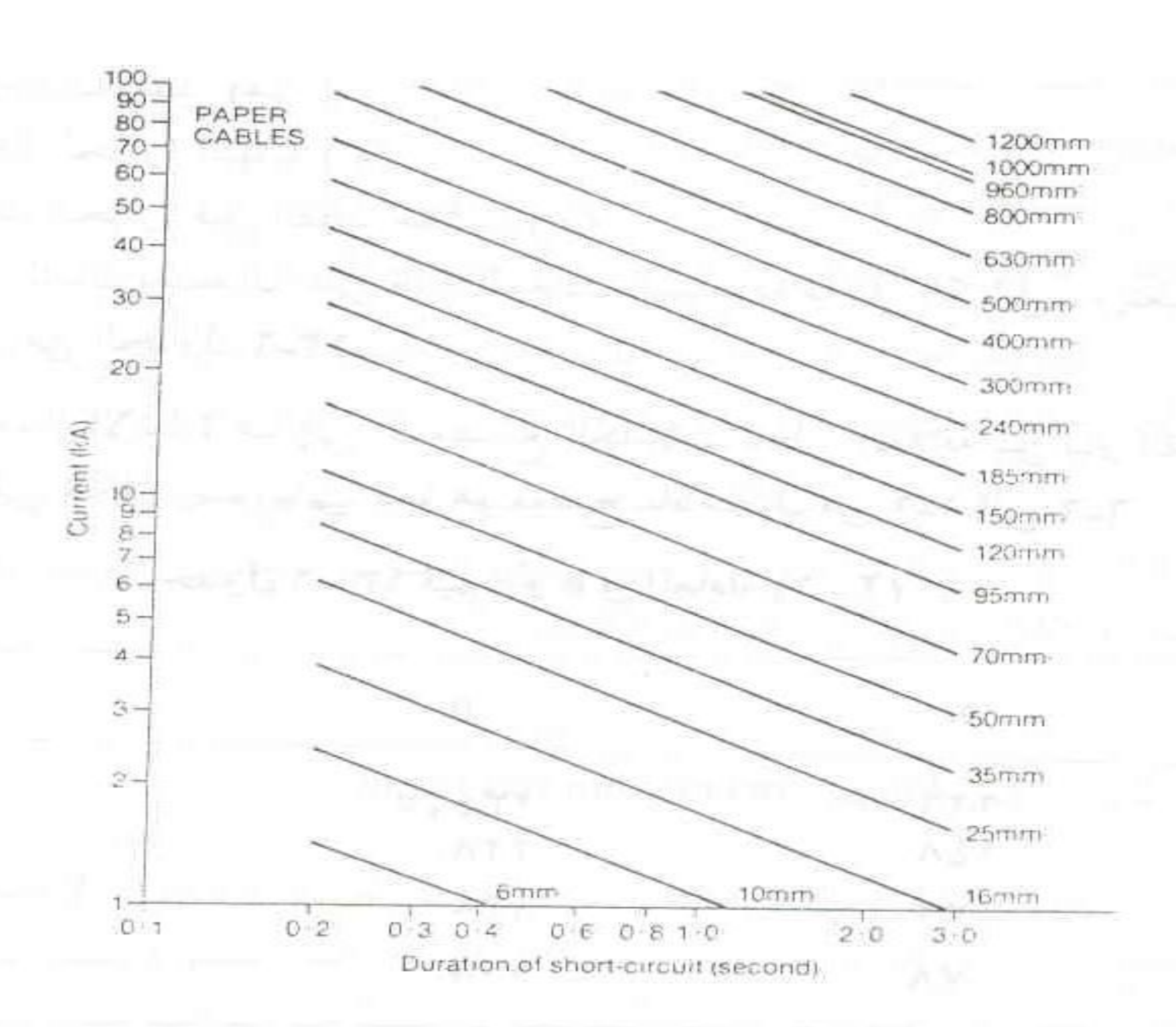
تجدار الإشارة هنا إلى أن مصانع الكابلات تعطى العلاقة بين تيار القصر وفترته على شكل رسم بياني كما هو موضح بالأشكال من ٦-١ إلى ٦-٦.

جدول ٦ - ١٣ قيم β و K في المعادلة (٦ - ٢)

المادة	β	K
نحاس	٢٣٤,٥	٢٢٦
ألومنيوم	٢٢٨	١٤٨
رصاص	٢٣٠	٣٢
صلب	٢٠٢	٧٨

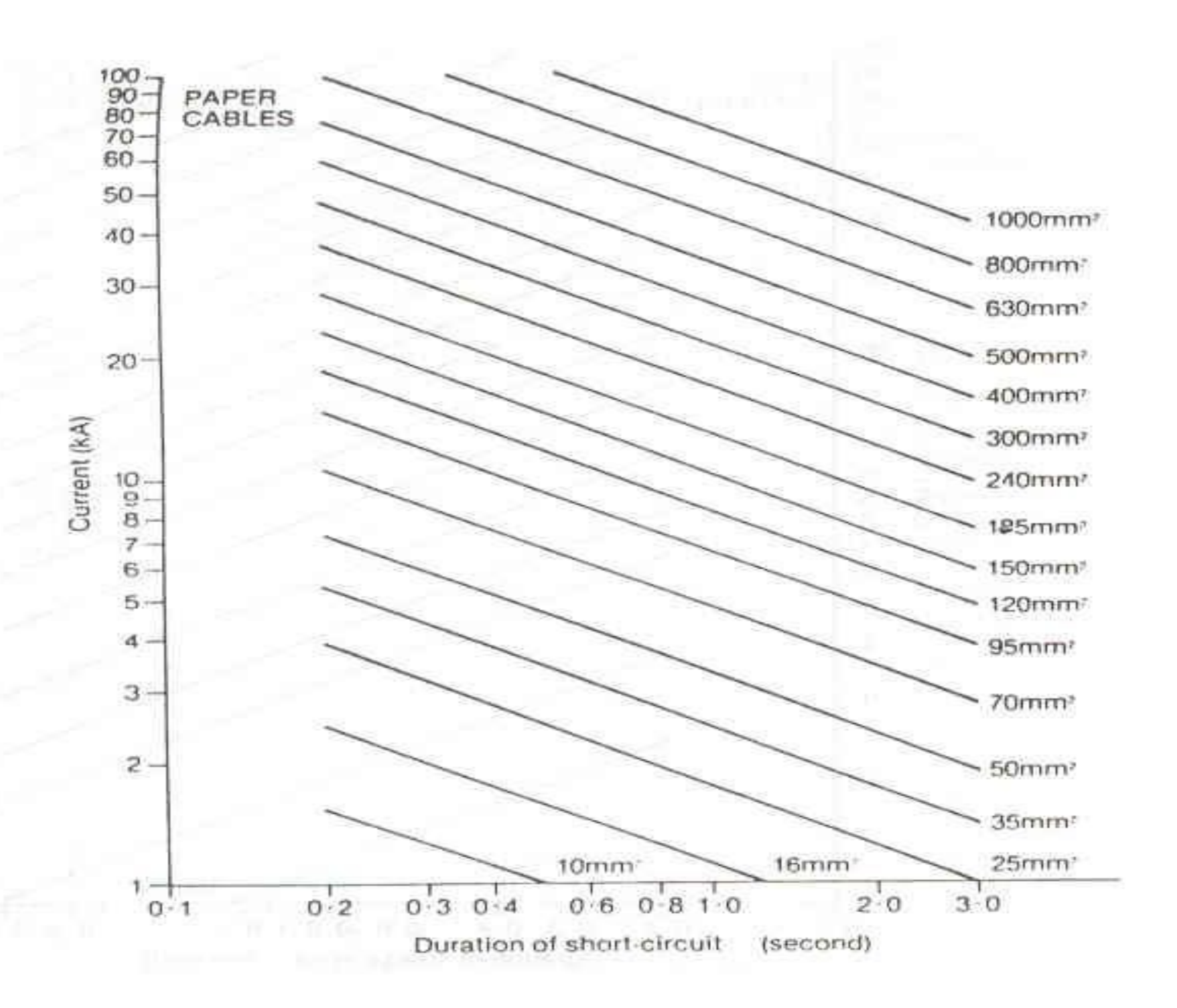
نود أن نذكر هنا إلى أن الإجهادات الميكانيكية الناشئة من تيار القصر قد تُقلل من الفترة الزمنية التي يتحملهاالكابل في وجود القصر، حيث يمكن أن تؤدي إلى انفجار الكابل في حالة الكابلات عديدة القلوب. يجب لذلك الاهتمام بهذه الظاهرة وخصوصاً في كابلات العوازل الورقية والكابلات البوليمرية غير المسلحة. إن استخدام الكابلات وحيدة القلب هو أفضل من هذه الناحية حيث لا تتولد قوى تنافر شديدة بين الموصلات وبعضها أثناء القصر كما يحدث في حالة الكابلات عديدة القلوب.

إضافة إلى ما سبق، فإن القصر غير المتماثل كالقصر بين أحد الخطوط والأرض يؤدي إلى تيار قصر غير متماثل مما يزيد من تيارات الغلاف والتسليح والتي تتأثر بشدة بهذه التيارات. نوصي بأخذ ذلك في الاعتبار والاسترشاد بالجداول من ٦-١٤ إلى ٦-١٩ في حالة الحاجة إليها وذلك لفترة قصر ثانية واحدة.

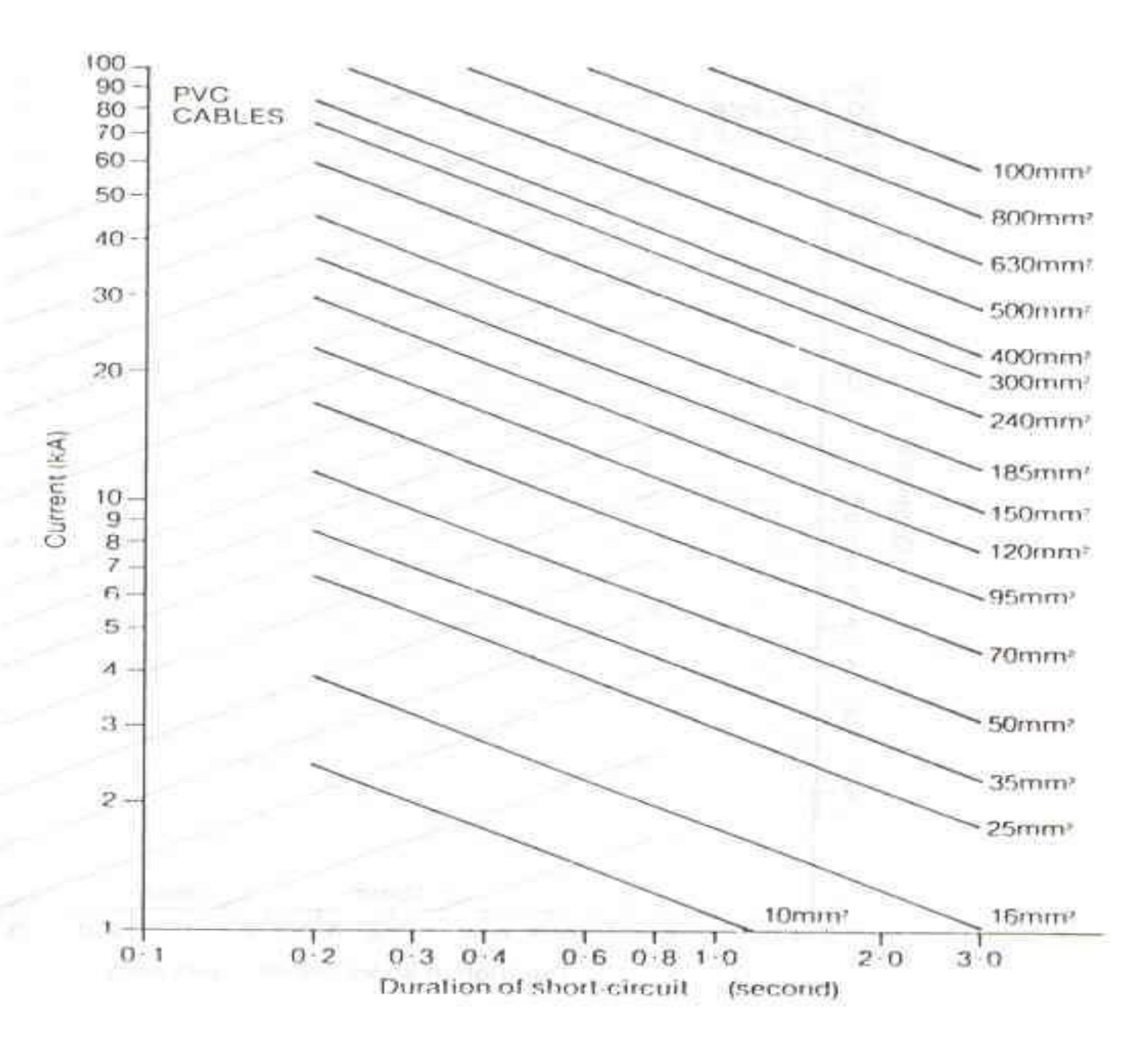


شكـل ٦ ـ ١ مقننات تيـار القصر للكـابـلات المعـزولـة بـالـورق وموصلات نحاسية. تطبق هذه المقننات حتى جهد ٦,٦/٣,٨ ك ف. ترفع هذه المقننات بالنسب الآتية للجهود الأعلى

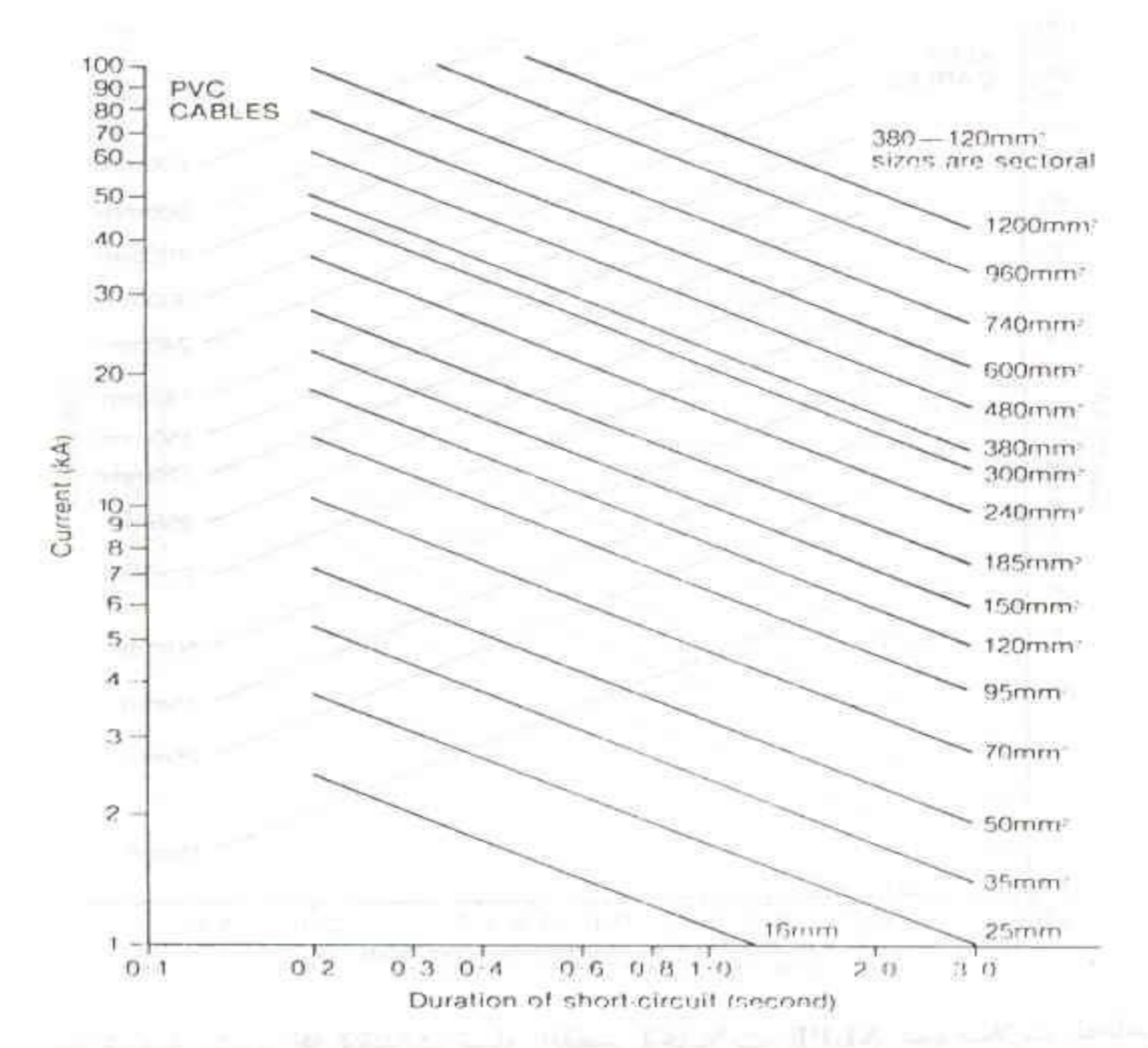
نوع الكابل	الجهد ك ف	النسب
٣ قلوب (شريط)	١١/٦,٣٥	١,٦
قلب واحد وثلاثة قلوب بستارة	١١/٦,٣٥ و ١٥/٨,٧	١,٠٧
قلب واحد وثلاثة قلوب	٢٢/١٢,٧ و ٣٣/١٩	١و١



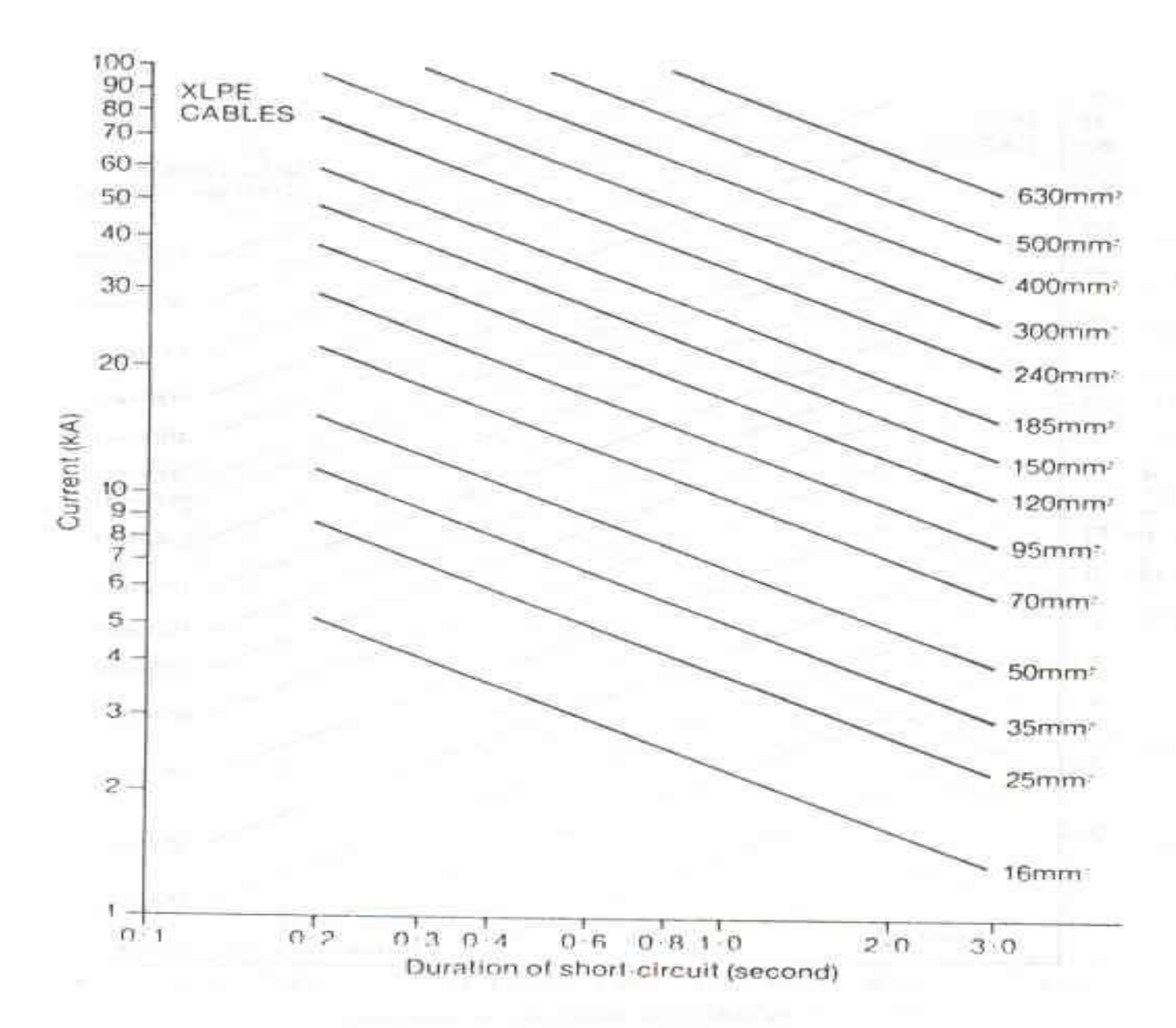
شكل ٦ - ٢ مقننات تيار القصر للكابلات المعزولة بالورق وموصلات نحاسية. ترفع هذه المقننات بنفس النسب الموجودة تحت الشكل ٦ - ١ للجهود الأعلى.



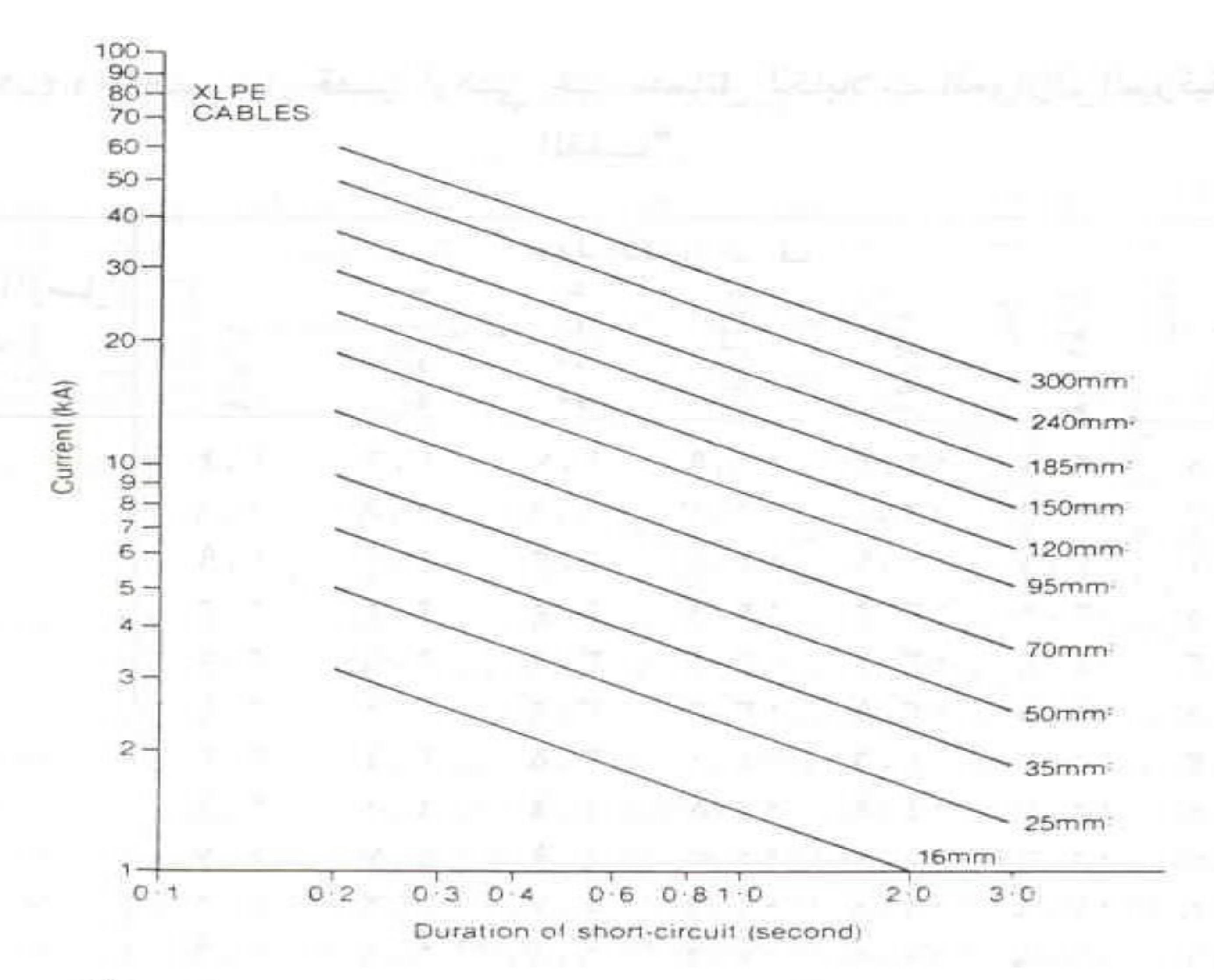
شكل ٦ ـ ٣ مقننات تيار القصر لكابلات PVC جهد ١ ك ف بموصلات نحاسية (على أساس درجة حرارة نهائية للموصل ١٥٠°م حتى مقطع ٣٠٠مم٢ ودرجة حرارة نهائية ١٣٠°م للموصلات الأكبر من ذلك).



شكل ٦ - ٤ مقننات تيار القصر لكابلات PVC جهد ١ ك ف بموصلات الومنيوم (على أساس درجة حرارة نهائية للموصل ١٥٠°م حتى مقطع ٣٠٠مم² ودرجة حرارة نهائية ١٣٠°م للموصلات الأكبر من ذلك).



شكـل ٦ ـ ٥ مقننات تيـار القصر لكابلات **XLPE** بموصلات نحاس على أساس ارتفاع ١٦٠°م في درجة الحرارة .



شكل ٦ ـ ٦ مقننات تيار القصر لكابلات XLPE بموصلات الومنيوم على أساس ارتفاع ١٦٠°م في درجة الحرارة.

جدول ٦-١٤ أقصى تيار قصر أرضي غير متماثل لكابلات العوازل الورقية وحيدة القلب*

حجم الموصل مم٢	جهد الكابل ك ف						
	١/٠.٦	٣.٣/١.٩	٦/٣.٦	١١/٦.٣٥	١٥/٨.٧	٢٢/١٢.٧	٣٣/١٩
٥٠	١,٤	١,٦	١,٧	٠١,٩	٠٢,٣	٠٢,٩	٠٣,٨
٧٠	١,٦	١,٨	١,٩	٠٢,٣	٠٢,٥	٠٣,١	٠٤,٠
٩٥	١,٩	٢,٠	٢,٣	٠٢,٥	٠٢,٩	٠٣,٦	٠٤,٦
١٢٠	٢,٢	٢,٤	٢,٥	٠٢,٩	٠٣,٢	٠٣,٨	٠٤,٨
١٥٠	٢,٥	٢,٦	٣,٠	٠٣,١	٠٣,٦	٠٤,٣	٠٥,٣
١٨٥	٢,٩	٣,٠	٣,٢	٠٣,٦	٠٣,٩	٠٤,٦	٠٥,٨
٢٤٠	٣,٣	٣,٤	٣,٨	٠٤,٠	٠٤,٦	٠٥,٣	٠٦,٣
٣٠٠	٣,٩	٤,٠	٤,٢	٠٤,٧	٠٤,٩	٠٥,٧	٠٦,٨
٤٠٠	٤,٧	٤,٧	٤,٩	٠٥,٥	٠٥,٧	٠٦,٦	٠٧,٧
٥٠٠	٥,٦	٥,٦	٥,٧	٠٦,١	٠٦,٨	٠٧,٦	٠٨,٨
٦٣٠	٦,٦	٦,٦	٦,٨	٠٧,٢	٠٧,٩	٠٨,٨	١٠,١
٨٠٠	٧,٧	٧,٧	٧,٩	٠٨,٣	٠٩,١	١٠,١	١١,٤
١٠٠٠	٩,٠	٩,٠	٩,٢	١٠,٢	١٠,٥	١١,٦	١٣,٠
٩٦٠**	—	—	—	٠٩,٨	١٠,٦	١١,٧	١٣,٢
١٢٠٠**	—	—	—	١١,٨	١٢,٢	١٣,٤	١٤,٩

* قيم التيار بالكيلو أمبير لفترة زمنية ١ ثانية.
** كابلات بموصلات نحاسية فقط.

جدول ٦ـ١٥ أقصى تيار قصر أرضي غير متماثل لكابلات العوازل الورقية عديدة القلوب*

حجم الموصل مم٢	٠,٦/١ك ف ٣ - قلب	٠,٦/١ك ف ٤ - قلب	١,٩/٣,٣ك ف ٣ - قلب	٣,٨/٦,٦ك ف ٣ - قلب	٦,٣٥/١١ك ف ٣ - قلب شريط	٦,٣٥/١١ك ف ٣ - قلب ستارة	٨,٧/١٥ ك ف ٣ - قلب ستارة	١٢,٧/٢٢ك ف ٣ - قلب ستارة	١٩/٣٣ ك ف ٣ - قلب ستارة
٤	٣.١	٣,٤							
٦	٣,٤	٣,٦							
١٠	٣,٨	٤,٩	٥,٠	٦,٤					
١٦	٤,٤	٥,٠	٥,١	٧,٣	١٠,١	١٠,١			
٢٥	٥,٢	٦,١	٦,٠	٨,٧	١١,٣	١١,٣	١٢,٨	١٧,٨	
٣٥	٦,٠	٦,٧	٦,٦	٩,٦	١١,٣	١١,٩	١٦,٢	١٩,٢	
٥٠	٦,٨	٨,٩	٨,٥	١٠,٣	١٤,٣	١٢,٠	١٦,٤	٢٠,٦	٢٦,٩
٧٠	٨,٧	١٠,٣	٩,٩	١١,٦	١٥,٧	١٥,٤	١٧,٨	٢١,٣	٢٧,٥
٩٥	١٠,١	١٢,٠	١١,٣	١٥,٠	١٧,٥	١٧,١	٢٠,١	٢٣,٢	٣٣,٥
١٢٠	١١,٤	١٥,٤	١٤,٤	١٦,٥	١٨,٦	١٨,٧	٢١,٣	٢٤,٩	٣٥,٧
١٥٠	١٥,٣	١٧,٩	١٦,٠	١٧,٩	٢٠,٢	٢٠,٢	٢٢,٩	٢٦,٧	٣٧,٠
١٨٥	١٧,١	٢٠,١	١٧,٥	١٩,٨	٢٢,١	٢٢,١	٢٤,٩	٣٣,٢	٣٩,٥
٢٤٠	١٩,٤	٢٣,٦	١٩,٨	٢٢,٦	٢٥,٠	٢٤,٦	٣٢,٢	٣٦,٨	٤٣,٠
٣٠٠	٢١,٨	٢٦,٣	٢٢,٦	٢٥,٠	٣١,٦	٣١,٦	٣٥,١	٣٩,٩	٤٦,٣
٤٠٠	٢٥,٠	٣٤,٥	٢٩,٨	٣٢,٦	٣٥,٦	٣٥,٧	٣٩,٣	٤٤,٤	٥١,٠

* قيمة التيار بالكيورأمبير لفترة زمنية ١ ثانية.

جدول ٦-١٦ أقصى تيار قصر أرضي غير متماثل لكابلات عوازل PVC بموصلات الومنيوم مصمتة ومسلحة*

حجم الموصل مم²	تسليح ألومنيوم		تسليح صلب			
	٠,٦/١ ك ف	١,٩/٣,٣ ك ف	٠,٦/١ ك ف			١,٩/٣,٣ ك ف
	قلب واحد	قلب واحد	قلبان	٣- قلب	٤- قلب	٣- قلب
١٦			١,٦	١,٨	٢,٧	٣,٣
٢٥			٢,٤	٢,٧	٣,٢	٣,٥
٣٥			٢,٦	٣,١	٣,٥	٣,٨
٥٠	٢,٨	٣,٢	٤,٠	٣,٥	٥,٠	٥,١
٧٠	٣,٢	٣,٦	٤,٤	٥,٠	٥,٥	٥,٧
٩٥	٣,٦	٥,٢	٤,٨	٥,٧	٦,٥	٦,٢
١٢٠	٥,٢	٥,٦		٦,١	٨,٩	٨,٤
١٥٠	٥,٧	٥,٩		٨,٤	٩,٧	٩,١
١٨٥	٦,٢	٦,٤		٩,٥	١٠,٨	٩,٧
٢٤٠	٧,٠	٧,٠		١٠,٦	١٢,١	١٠,٦
٣٠٠	٧,٦	٧,٦		١١,٧	١٣,٤	١١,٧
٣٨٠	١٠,٩	١٠,٩				
٤٨٠	١٢,٢	١٢,٢				
٦٠٠	١٢,٩	١٢,٩				
٧٤٠	١٧,٨	١٧,٨				
٩٦٠	٢٠,٢	٢٠,٢				
١٢٠٠	٢٢,١	٢٢,١				

* قيمة التيار بالكيلوأمبير لفترة زمنية ١ ثانية

جدول ٦-١٧ أقصى تيار قصر أرضي غير متماثل لكابلات عوازل PVC بموصلات نحاس ومسلحة*

حجم الموصل مم²	تسليح ألومنيوم		تسليح صلب			
	٠,٦/١ك ف	١,٩/٣,٣ك ف	٠,٦/١ ك ف			١,٩/٣,٣
	قلب واحد	قلب واحد	قلبان	٣- قلب	٤- قلب	٣- قلب
١,٥			٠,٧	٠,٧	٠,٧	
٢,٥			٠,٨	٠,٨	٠,٩	
٤			٠,٩	١,٠	١,٥	
٦			١,٠	١,٥	١,٧	
١٠			١,٨	١,٩	٢,١	
١٦			١,٧	١,٩	٢,٧	٣,٣
٢٥			٢,٧	٢,٩	٣,٤	٣,٦
٣٥			٢,٩	٣,٣	٣,٧	٤,٠
٥٠	٣,١	٣,٥	٣,٣	٣,٧	٥,٤	٥,٤
٧٠	٣,٥	٣,٩	٣,٧	٥,٣	٦,١	٦,١
٩٥	٤,٠	٥,٧	٥,٤	٦,١	٧,٠	٩,١
١٢٠	٥,٧	٦,٢	٥,٨	٦,٦	٩,٧	٩,٧
١٥٠	٦,٤	٦,٥	٦,٤	٩,٣	١٠,٨	١٠,٤
١٨٥	٧,٠	٧,٠	٨,٩	١٠,٢	١١,٧	١١,٤
٢٤٠	٧,٨	٧,٨	٩,٩	١١,٤	١٣,٢	١٢,٧
٣٠٠	٨,٦	٨,٦	١١,٠٠	١٢,٧	١٤,٧	١٤,٠٠
٤٠٠	١٢,٢	١٢,٢	١٢,٣	١٤,٠	٢٠,٦	
٥٠٠	١٣,٤	١٣,٤				
٦٣٠	١٤,٦	١٤,٦				
٨٠٠	٢٠,٦	٢٠,٦				
١٠٠٠	٢٢,٩	٢٢,٩				

جدول ٦-١٨ أقصى تيار أرضي غير متماثل لكابلات عوازل XLPE بموصلات الومنيوم مصمتة ومسلحة*

حجم الموصل مم٢	تسليح ألومنيوم ٠,٦/١ك ف قلب واحد	١,٩/٣,٣ك ف قلب واحد	تسليح صلب ٠,٦/١ ك ف قلبان	٣- قلب	٤- قلب	١,٩/٣,٣ ٣- قلب
١٦			١,٢	١,٤	١,٦	٢,٧
٢٥			١,٥	٢,٣	٢,٦	٣,٠
٣٥			٢,٢	٢,٦	٢,٩	٣,٢
٥٠	١,٦	٢,٨	٢,٤	٢,٩	٣,٣	٤,٥
٧٠	٢,٦	٣,١	٢,٨	٣,٣	٤,٩	٥,٠
٩٥	٣,٠	٣,١	٤,١	٤,٨	٥,٤	٥,٥
١٢٠	٣,٢	٤,٣		٥,٢	٧,٦	٧,٤
١٥٠	٤,٨	٤,٦		٧,٤	٨,٤	٨,٠
١٨٥	٥,٢	٥,٢		٨,٢	٩,٤	٨,٦
٢٤٠	٥,٧	٥,٧		٩,٢	١٠,٥	٩,٦
٣٠٠	٦,٣	٦,٣		١٠,١	١١,٧	١٠,٣

* قيمة التيار بالكيلوأمبير لفترة زمنية ١ ثانية

جدول ٦-١٩ أقصى تيار قصر أرضي غير متماثل لكابلات عوازل XLPE بموصلات نحاسية ومسلحة*

حجم الموصل مم٢	تسليح ألومنيوم		تسليح صلب			
	٠.٦/١ك ف	١.٩/٣.٣ك ف	٠.٦/١ ك ف			١.٩/٣.٣
	قلب واحد	قلب واحد	قلبان	٣- قلب	٤- قلب	٣- قلب
١٦			١.٧	١.٧	١.٩	٣.١
٢٥			١.٧	٢.٤	٢.٧	٣.١
٣٥			٢.٤	٢.٧	٣.١	٣.٣
٥٠	١.٨	٢.٧	٢.٦	٣.٠	٣.٥	٤.٦
٧٠	٢.٧	٣.١	٣.١	٣.٥	٥.١	٥.١
٩٥	٣.١	٣.٣	٤.٤	٥.٠	٥.٧	٥.٧
١٢٠	٣.٣	٤.٨	٤.٩	٥.٥	٨.٠	٧.٨
١٥٠	٤.٨	٥.١	٥.٤	٧.٨	٩.٠	٨.٤
١٨٥	٥.٤	٥.٧	٧.٤	٨.٦	٩.٩	٩.٠
٢٤٠	٦.٠	٦.٠	٨.٤	٩.٧	١١.٣	٩.٩
٣٠٠	٦.٤	٦.٨	٩.٢	١٠.٥	١٢.٤	١٠.٩
٤٠٠	٩.١	٩.١				
٥٠٠	١٠.٥	١٠.٥				
٦٣٠	١١.٨	١١.٨				

* قيمة التيار بالكيلوأمبير لفترة زمنية ١ ثانية

رابعاً: هبوط الجهد Voltage drop

يجب عند اختيار الكابل معرفة مقدار الهبوط في الجهد بين طرفيه، حيث يحدد ذلك مقدار تنظيم الجهد Voltage regulation بين طرفي الكابل وكذلك عند كل حمل.

جرت العادة على أن يُعطى الهبوط الذي يسببه مرور التيار في موصل الكابل على أساس كل موصل على حدة، ويُحسب عادة بالمللي ڤولت لكل أمبير لكل متر من طول الكابل. ويمكن حسابه من العلاقتين الآتيتين:

لدائرة أحادية الطور $mV = 2Z$

لدائرة ثلاثة الأطوار $mV = \sqrt{3}\,Z$

حيث: mV = هبوط الجهد بالمللي ڤولت/أمبير/متر من طول الكابل.

Z = المعاوقة لكل موصل/كيلومتر من طول الكابل بالأوم عند أقصى درجة حرارة تشغيل.

ونلاحظ ما يأتي:

أ - في دوائر الطور الواحد يتم حساب Z لموصلي الدائرة (موصل الطور وموصل التعادل).

ب - في الدوائر ثلاثية الأطوال تكون Z هي معاوقة موصل الطور فقط.

حـ - لإيجاد النسبة المئوية لهبوط الجهد تُقسم قيمة الهبوط في الجهد على جهد الطور في دوائر الطور الواحد وعلى جهد الخط في الدوائر ثلاثية الأطوار.

ويتم اختيار الكابل بحيث لا يتعدى هبوط الجهد بين طرفي الكابل الحدود المسموح بها في المواصفات القياسية. يتضح من هنا أهمية أخذ قيمة هبوط الجهد في الاعتبار، حيث يمكن أن نجد أن الكابل له قدر ة على حمل التيار المطلوب إلا أن هبوط الجهد بين طرفيه يتعدى المسموح بها بسبب طول مسار الكابل.

تعطى أغلب مصانع الكابلات جداول تحتوي على قيم الهبوط في الجهد عند قيم مختلفة من تيار الموصل.